

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DA
COMPUTAÇÃO**

Claunir Pavan

**GERAÇÃO DA TOPOLOGIA VIRTUAL
EM REDES FOTÔNICAS**

Dissertação submetida à Universidade Federal de Santa Catarina como parte dos requisitos para a obtenção do grau de Mestre em Ciência da Computação

Elizabeth Sueli Specialski

Florianópolis, fevereiro de 2003

GERAÇÃO DA TOPOLOGIA VIRTUAL EM REDES FOTONICAS

Claunir Pavan

Esta Dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Ciência da Computação Área de Concentração Sistemas de Computação e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação.

Dr. Fernando Alvaro Ostuni Gauthier

Banca Examinadora

Dra. Elizabeth Sueli Specialski (orientadora)

Dr. Alexandre Moraes Ramos

Dr. Vitório Bruno Mazzola

Agradeço a todas as pessoas que souberam entender o quanto este trabalho significaria para mim, desde o momento da decisão de fazê-lo até a sua conclusão, principalmente a minha família.

Em especial, ainda, gostaria de manifestar a minha gratidão pela desfrutável, verdadeira e imprescindível participação na minha vida, da minha namorada Márcia Andréia Trichês, que nos momentos finais, os julgados mais importantes, soube de forma inteligente, entender, incentivar...

A toda a raça do Setor de Tecnologia da UNOESC São Miguel, que tiveram a paciência de ouvir inúmeras vezes a palavra “Veja”, seguida de uma tentativa de explicação sobre algum assunto das redes fotônicas.

Ao meu co-orientador Max Mauro Dias Santos, que sempre que possível, mostrou-se presente, participativo e incentivador, com quem tive a felicidade de compartilhar inúmeros conhecimentos adquiridos.

Por fim, não menos importante, agradeço à minha orientadora Elizabeth Sueli Specialski, que teve a coragem de aceitar-me como orientando e que também teve participação ímpar na construção do conhecimento aqui exposto.

SUMÁRIO

ÍNDICE DE FIGURAS	vi
ÍNDICE DE TABELAS	viii
RESUMO.....	ix
ABSTRACT	x
1 INTRODUÇÃO	11
1.1 Problema.....	12
1.2 Justificativa	13
1.3 Objetivo do trabalho	14
1.4 Organização do trabalho	15
2 EVOLUÇÃO DAS REDES ÓPTICAS.....	16
2.1 Arquitetura das Redes Ópticas.....	18
2.1.1 Redes Ponto-a-Ponto	18
2.1.2 Redes de Acesso.....	18
2.1.3 Redes de Caminhos Ópticos.....	18
2.2 Tecnologias de Multiplexação.....	19
2.2.1 Multiplexação – TDM.....	19
2.2.2 Multiplexação – FDM.....	20
2.2.3 Multiplexação – WDM	20
2.2.4 Multiplexação – DWDM	21
2.2.5 Matriz de Tráfego	22
2.3 Gerações das Redes Ópticas	24
2.3.1 Primeira Geração das Redes Ópticas	24
2.3.2 Segunda Geração das Redes Ópticas	24
2.3.2.1 Acopladores ópticos.....	26
2.3.2.2 Topologias	28
2.3.2.3 Contenção e colisão em redes ópticas	32
2.3.2.4 Protocolo de controle de acesso ao meio	32
2.3.3 Terceira Geração	35
2.4 Conclusão	39
3 COMPONENTES DE UM SISTEMA ÓPTICO.....	41

3.1	Fibras Ópticas	41
3.1.1	Atenuação da fibra óptica	42
3.1.2	Dispersão da fibra óptica	43
3.1.3	Modulação óptica.....	43
3.2	Lasers	43
3.2.1	Características dos Lasers	44
3.3	Fotodetectores	45
3.4	Amplificadores ópticos	45
3.5	Elementos de Comutação	46
3.6	Elementos Interconectores de Fibras.....	48
3.9	Roteadores de comprimentos de onda não reconfiguráveis.	48
3.10	Roteadores Reconfiguráveis	49
3.11	Conversão de comprimento de onda.....	50
3.12	Tecnologias de conversão de comprimento de onda.....	52
3.13	Multiplexador de inserção/remoção de comprimentos de onda - WADM.....	52
3.14	Redes de Transporte Óptico	53
3.15	Conclusão.....	55
4	DESENVOLVIMENTO.....	56
4.1	Coleta de Dados.....	56
4.2	Topologia Virtual em Redes Fotônicas	58
4.3.	Topologia Física X Topologia Virtual.....	60
5	RESULTADOS	62
5.1.	Apresentação dos Testes.....	68
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	95
7	REFERÊNCIAS	97
8	ANEXOS	99

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Multiplexação TDM.....	19
Figura 2: Multiplexação WDM.	20
Figura 3: Rede óptica – Estrela	25
Figura 4: Rede óptica – Barramento.....	25
Figura 5: Acoplador óptico 2x2.....	26
Figura 6: Acoplador óptico 4x4 para topologia em estrela.	27
Figura 7: Topologia física em estrela – rede Broadcast and Select.....	28
Figura 8: Topologia Física.....	29
Figura 9: Topologia Virtual.....	29
Figura 10: Topologia física com conectividade total.	30
Figura 11: Topologia física com multihop.	31
Figura 12: Topologia virtual (possível).....	31
Figura 13: Topologia Física de uma rede óptica.	36
Figura 14: Modelo esquemático em camadas de uma rede WDM.....	36
Figura 15: Topologia física do anel bidirecional com comprimentos de onda.	37
Figura 16: Reflexão interna total (SOUZA, 2002).....	41
Figura 17: Janelas ópticas (SOUZA, 2002).....	42
Figura 18: Elementos interconectores 2x2 (WIRTH, 2002).	48
Figura 19: Roteador 4x4.....	49
Figura 20: Roteador reconfigurável 4x4 (WIRTH, 2002).....	50
Figura 21: Rede óptica roteada em comprimento de onda (WIRTH, 2002).	50
Figura 22: Restrição de continuidade do comprimento de onda (WIRTH, 2002).	51
Figura 23: Restrição de continuidade do comprimento de onda (WIRTH, 2002).	51
Figura 24: WADM (Multiplexador de inserção e exclusão de comprimento de onda) (WIRTH, 2002).	52
Figura 25: Nó de interconexão de comprimento de onda (WIRTH, 2002).....	54
Figura 26: Topologia virtual sobre topologia física (WIRTH, 2002).....	59
Figura 27: Grafo de uma possível topologia física para uma rede de 6 nós (WIRTH, 2002).....	60
Figura 28: Uma possível topologia virtual para uma rede de 6 nós (WIRTH, 2002).	60

Figura 29: Algoritmo HLDA	63
Figura 30: Mapa da topologia Física do estado de Santa Catarina (hipotético).....	66
Figura 31: Topologia física da rede do estado de Santa Catarina (hipotética).....	67

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1: Exemplo de matriz de tráfego.	23
Tabela 2: Tabela de roteamento e atribuição de comprimentos de onda.....	38
Tabela 3: Matriz de tráfego de uma rede de 13 nós. (hipotética).....	66
Tabela 4: Topologia Física com seis nós roteadores.....	68
Tabela 5: Topologia Virtual para uma rede com seis nós	68
Tabela 6: Topologia Física com onze nós roteadores.....	69
Tabela 7: Topologia Virtual para uma rede com onze nós.....	69
Tabela 8: Topologia Física para uma rede com dezoito nós.....	70
Tabela 9: Topologia Virtual para uma rede com dezoito nós	71
Tabela 10: Topologia Virtual para uma rede com vinte e cinco nós	73
Tabela 11: Topologia Virtual para uma rede com vinte e cinco nós	74
Tabela 12: Topologia Física para uma rede com trinta e cinco nós	77
Tabela 13: Topologia Virtual para uma rede com trinta e cinco nós.....	79
Tabela 14: Topologia Física para uma rede com quarenta e cinco nós.....	85
Tabela 15: Topologia Virtual para uma rede com quarenta e cinco nós	87

RESUMO

Nas últimas décadas houve um aumento significativo na capacidade de transporte de dados em redes fotônicas, e hoje já é possível se falar em taxas de Terabits por segundo com o uso da tecnologia de multiplexação por divisão em comprimento de onda (WDM). A diferença entre capacidade de transmissão óptica e eletrônica é geralmente chamada de gargalo eletrônico. De qualquer forma, o espectro óptico também possui limitações; daí surge o interesse para os estudos da reutilização dos comprimentos de onda. Este trabalho resulta de um estudo da coordenação de caminhos ópticos e comprimentos de onda para redes fotônicas, mais especificamente o projeto de topologias virtuais sobre uma topologia física existente, visando diminuir a necessidade de conversão e processamento óptico-elétrico-óptico (O-E-O). Apresenta-se a implementação de um sistema com base heurística para a geração de caminhos ópticos que contribuam para a otimização do tráfego a partir de uma matriz de tráfego (padrão de tráfego da rede) e topologia física conhecida. Também são apresentadas as evoluções das redes ópticas, distinta em gerações, os demais conceitos importantes sobre os elementos necessários para a constituição de um sistema óptico e, finalmente, os resultados dos testes realizados sobre uma rede óptica hipotética.

ABSTRACT

In the last decades there was a significant increase on data transport capacity in photonic nets. Nowadays it is already possible to speak in terms of Terabits per second rates using the Wavelength Division Multiplexing (WDM). The difference among the optical and electronic transmission capacity is generally called of electronic bottleneck. In any way, the optical spectrum also presents limitations, and so, the interest for the re-use of the wavelengths studies happens.

This work results from the study about the coordination of optical roads and wavelengths for photonic nets. More specifically, the main objective of this project isto creates a virtual topology on an existent physical topology, in order to decrease the optical-electric-optical conversion process time. The system implementation using a heuristic base for the generation of optical routes as a contribution for the traffic optimization is presented. The evolution of the different optical nets is presented in generations, as well as other important concepts about the necessary elements for the constitution of an optical system. Finally, the results of the tests accomplished on a hypothetical optical net are commented.

1 INTRODUÇÃO

Percebe-se um crescente e constante aumento no número de usuários que utilizam as redes de dados. Paralelamente, as novas aplicações tais como multimídia, vídeo conferência e telemedicina são exemplos de serviços que exigem uma grande largura de banda para o transporte de seus dados em rede.

As atuais redes de computadores utilizam uma pequena fração da largura de banda disponível nos links de transmissão por fibra óptica. Uma incompatibilidade entre os componentes ópticos e eletrônicos mostra-se evidente em uma rede de computadores, o que resulta em um gargalo nos nós de processamento eletrônico.

O advento da tecnologia ATM (Modo de Transmissão Assíncrono) com o novo padrão de transmissão SDH (Hierarquia Digital Síncrona) constituem o alargamento desse gargalo, mantendo-o, porém, ainda dentro dos limites de desempenho permitidos pelo processamento eletrônico, sem necessariamente explorar a grande capacidade de transmissão da fibra óptica. A tecnologia mais viável, até o momento, para superar esse descompasso, é a multiplexação por divisão de comprimento de onda (WDM), que consiste em modular eletronicamente vários comprimentos de onda por sinais distintos e propagá-los ao mesmo tempo numa fibra óptica, constituindo a arquitetura chamada rede óptica por divisão em comprimento de onda (RAMASWAMI & SIVARAJAN, 1998).

A tecnologia para dar suporte a uma rede completamente óptica está crescendo de uma forma impressionante, sendo os desenvolvimentos recentes mais importantes a comercialização de amplificadores a fibras dopadas com érbium (EDFAs) e o desenvolvimento de nós que procedem o roteamento da informação nos domínios fotônicos. O mercado atual tem necessidade de crescimento da capacidade dos backbones a fim de sanar a demanda crescente por serviços que utilizam faixa larga. Sabendo-se que, em muitos casos, é relativamente custoso o lançamento de novas fibras, sistemas de transmissão com técnicas de multiplexação estão sendo constantemente pesquisados (ANDRADE, 2001).

Na multiplexação no domínio temporal, vários canais de dados de baixa velocidade são multiplexados em um único canal de alta velocidade. A maior taxa de transmissão utilizada em sistemas eletrônicos comercialmente disponíveis está em torno dos 10 Gbps, com os limites atuais em torno dos 40 Gbps. Para conseguir fazer com que a tecnologia TDM (Time Division Multiplexing), ultrapasse essas taxas, estão sendo pesquisados métodos para realizar a multiplexação e demultiplexação no domínio óptico (OTDM) (Optical Time Division Multiplexing). Essa tecnologia, entretanto, irá requerer a geração e transmissão de pulsos extremamente estreitos, além de processamento digital no domínio óptico (BANERJEE & MUKHERJEE 1996).

Na transmissão WDM, cada comprimento de onda (frequência óptica) é modulado eletronicamente por um canal de dados. Esses comprimentos de onda, por sua vez, são multiplexados e transmitidos ao mesmo tempo numa mesma fibra. Dessa maneira, a WDM não apenas permite o uso da enorme largura de banda presente em cada fibra, como também provê canais cuja banda individual estão dentro da capacidade convencional dos dispositivos que processam as informações em nível eletrônico (RAMASWAMI & SIVARAJAN, 1998).

Assim, o uso da WDM permite um grande aumento na capacidade de transmissão, sem a necessidade de instalação de novas fibras, além da redução dos custos resultantes do compartilhamento de amplificadores ópticos.

1.1 Problema

O crescimento constante do tráfego de internet demanda o desenvolvimento e atualização de tecnologias como WDM. As primeiras arquiteturas que estão surgindo utilizam cross connects (OXC) para interconectar roteadores IP, os quais se comunicam através de caminhos ópticos (comprimentos de onda atravessando vários enlaces físicos). Ou seja, dada uma demanda de caminhos ópticos entre roteadores IP, configura-se estes caminhos entre os roteadores de maneira que o tráfego seja conduzido da fonte para o destino sem comutação eletrônica nos nós intermediários, formando uma topologia virtual.

Evidentemente, as grandes vantagens do uso de uma topologia virtual distinta da topologia física são: a) diminuição do processamento eletrônico, já que não existe comutação nos nós intermediários; b) Reconfiguração quando ocorre mudança de tráfego; diferentemente da topologia física, em que as conexões são fixas (RAMASWAMI & SIVARAJAN, 1998).

É importante lembrar que o problema de projeto de uma topologia virtual é NP-difícil, mesmo para o caso em que a topologia física é dada por um simples anel. Como consequência desse fato, bons valores de limites superiores e inferiores (isto é, limites próximos a solução ótima) são úteis não só para se avaliar a performance das abordagens heurísticas mas também para investigar a qualidade de uma formulação específica (CAMPELO, R. WALDMANN, H. 2000).

Um problema NP-Difícil significa que possui ordem de complexidade exponencial. Em outras palavras, o esforço computacional para a sua resolução cresce exponencialmente com o tamanho do problema (dado pelo número de pontos a serem atendidos). Em termos práticos, isto significa que não é possível resolver até a otimalidade problemas reais pertencentes a classe NP-difícil. Conseqüentemente, os métodos de solução aplicados a instâncias reais são, em geral, heurísticos, isto é, não asseguram a obtenção da solução ótima do ponto de vista matemático (DA CUNHA, 2003).

De maneira geral, os problemas de projeto da topologia virtual e de roteamento e alocação de comprimento de onda são formulados através de técnicas de otimização para maximizar o throughput e diminuir o número de hops da rede ou outras medidas de interesse. Estratégias heurísticas são utilizadas para encontrar soluções viáveis, próximas a uma solução ótima (CAMPELO & WALDMANN, 2000).

1.2 Justificativa

Por se tratar de uma tecnologia emergente e muitos autores batizarem a WDM como uma potencial candidata aos backbones das redes WAN, este trabalho foca os esforços no problema do projeto da topologia virtual em redes ópticas. A maioria dos sistemas de geração de topologias virtuais existentes possuem uma implementação

visando resultados exatos, fato que, para redes com grande quantidade de nós roteadores, mais de 40, o tempo necessário para a obtenção da solução pode ser da ordem de dias, o que em determinadas situações, pode inviabilizar a prática. Logo, propõe-se aqui o desenvolvimento de um sistema para geração da topologia virtual com base heurística, que resulte topologias virtuais em tempos curtos, na ordem de menos de 5 minutos.

Isto posto, percebe-se que é necessário buscar meios inteligentes para a otimização de redes fotônicas com encaminhamento por comprimento de ondas. A solução desse problema pode ser encontrada com técnicas de programação linear inteira mista (MILP) e com técnicas heurísticas.

Na solução MILP, os problemas de otimização são formulados em termos de variáveis de decisão, onde também estão presentes algumas restrições. Na topologia virtual, o tráfego que atravessa o link virtual i - j é denotado por λ_{ij} , então, o tráfego máximo do link sobre todos os links é determinado por $\lambda_{Max} = \text{Max } \lambda_{ij}$. Cada λ_{ij} pode ser um tráfego heterogêneo que atravessa o link virtual i - j . Assim, é preciso ter o controle da vazão de cada nó e o conhecimento do degrau virtual de cada nó, a fim de permitir a conservação da vazão para cada nó roteador.

1.3 Objetivo do trabalho

O problema da topologia virtual pode ser encarado com técnicas de programação linear e também através de técnicas heurísticas. A primeira visa resultados exatos, o que, às vezes, a torna inadequada devido ao tempo de retorno da solução. A segunda resulta em aproximações do resultado preciso, porém com tempos de retorno mais agradáveis.

Pretende-se neste estudo, desenvolver um sistema, utilizando-se a técnica heurística proposta por Ramaswami, (RAMASWAMI & BANERJEE, 1996), para o projeto da topologia virtual em redes ópticas, onde o objetivo é minimizar o número de *hops* de um pacote, o que minimizará o processamento eletrônico na rede.

O número de *hops* de um pacote é uma métrica importante numa rede de caminhos ópticos, sua minimização pode agregar *throughput* à rede, maximizando a presença de fluxos balanceados.

Segundo Ramaswami, se a capacidade do canal é C , o número de canais é L , e o número de *hops* é H , então o *throughput* da rede é dado por:

$$\boxed{T \leq C.L / H}$$

Ou seja, minimizar H é o equivalente a maximizar o *throughput* da rede (RAMASWAMI & BANERJEE, 1996).

1.4 Organização do trabalho

O capítulo 2 apresenta os conceitos e características da comunicação óptica, descrevendo algumas das tecnologias envolvidas no processo de transmissão. No capítulo 3, as redes são divididas em três gerações distintas, apresentando-se as evoluções ocorridas e os equipamentos necessários em um sistema óptico. O capítulo 4 apresenta comentários sobre o sistema implementado e o capítulo 5 detalha os testes e resultados obtidos.

2 EVOLUÇÃO DAS REDES ÓPTICAS

Este capítulo, inicialmente exhibe recursos aplicados numa rede óptica, seguido de uma abordagem sobre os detalhes de sua evolução em três gerações, a primeira caracterizada pela utilização de fibras ópticas na transmissão, a segunda pelos arranjos ópticos para maior desempenho e a terceira pela utilização do roteamento de comprimentos de onda.

O advento e transmissão nas fibras ópticas têm sido um fator importante no crescimento da largura de banda nas redes de telecomunicações. As fibras, por suas características, apresentam inúmeras vantagens em relação aos meios físicos metálicos (coaxial, par trançado) e comunicação por microondas. Algumas das vantagens que as fibras apresentam estão relacionadas a:

- Total imunidade a interferências eletromagnéticas - por serem constituídas de material dielétrico, são imunes a qualquer interferência eletromagnética de qualquer intensidade;
- Dimensões reduzidas - podem ser até 20 vezes menor em tamanho e peso do que um cabo metálico com a mesma capacidade de transmissão;
- Segurança no tráfego de informações, uma vez que a luz é utilizada como sinal de comunicação, traz grandes dificuldades para o grampeamento dos sinais;
- Maiores distâncias nas transmissões devido as pequenas perdas na comunicação;
- Maior capacidade de transmissão, uma vez que esta está relacionada com a frequência das portadoras ou comprimento de onda de luz utilizado.

Sendo assim, tornam-se o meio preferido à transmissão de dados em qualquer sistema com taxas de transmissão superiores a algumas dezenas de Mbps e sobre distâncias maiores que 1Km, embora, muitas vezes, sejam utilizadas para interconexões com pequenas distâncias entre computadores (WIRTH, 2002).

No ambiente de redes existente hoje, as fibras estão sempre de alguma forma sendo utilizadas, porém, a diferença destas para as redes convencionais é simplesmente a substituição do cobre por fibras ópticas, qualquer função de comutação, processamento e roteamento do sinal continua sendo realizado em nível eletrônico (WIRTH, 2002).

No começo da década de 90, começou-se a pensar em arquiteturas de redes inovadoras, capazes de tirar proveito da intercomunicação óptica para algo superior a simples transmissão ponto-a-ponto. A maior parte dos esforços concentrou-se em redes WDM Broadcast and Select, como por exemplo, as redes OTDM (NASCIMENTO, 2001).

A partir da década de 90, os estudos dirigiram-se para o processamento na parte óptica, o que diminuiria a sobrecarga do processamento eletrônico trazendo vantagens, como por exemplo, transparência da rede (transporte de vários tipos de sinal) e maior capacidade de transmissão. (NASCIMENTO, 2001). Redes com algumas dessas características já estão disponíveis comercialmente e já começaram a ser implementadas. No final da década de 90, o desenvolvimento de sistemas WDM de alta capacidade com 8 a 32 comprimentos de onda, cada qual transportando informações a 2.5 Gbps já tornara-se uma realidade prática. Pesquisas laboratoriais já demonstram experimentos com taxas que chegam a atingir 2 Tbps de capacidade total (ANDRADE, 2001)

Em decorrência das inúmeras vantagens da utilização das fibras ópticas e da crescente demanda por serviços de banda larga, os investimentos focaram-se na transmissão de nível fotônico. Contudo, devido ao gargalo do processamento de dados em nível eletrônico, a simples transmissão em meios ópticos não consegue utilizar a largura de banda disponível nas fibras, justificando os estudos para a utilização de diversos comprimentos de onda em uma única fibra (NASCIMENTO, 2001).

Segundo Raul Camelo [2002], a evolução das redes ópticas divide-se em três gerações: as redes ópticas de primeira geração, que caracterizam-se pela simples substituição dos meios de transmissão existentes por fibras ópticas; a segunda geração onde as fibras são dispostas em arranjos ópticos específicos para o desempenho de suas

funções e, finalmente, as redes de terceira geração que empregam roteamento de comprimento de onda. Essa evolução é apresentada, em seguida, com maiores detalhes.

2.1 Arquitetura das Redes Ópticas

Nas redes ópticas, quem define a arquitetura é basicamente o esquema de multiplexação utilizado, sendo que os esquemas mais estudados hoje são a multiplexação por divisão de comprimento de onda (WDM) e a multiplexação óptica por divisão no tempo (OTDM). As redes WDM ainda podem ser subdivididas em ponto-a-ponto, redes de acesso, redes broadcast and select ou fotodifusão, e redes com encaminhamento no comprimento de onda (NASCIMENTO, 2001).

2.1.1 Redes Ponto-a-Ponto

O esquema de redes ponto a ponto com WDM não se constitui em uma rede no sentido usual, tratando-se apenas de um subsistema de transmissão. As aplicações da tecnologia WDM no subsistema de transmissão incluem o aumento da capacidade de transmissão em sistemas de longa distância e a resolução dos problemas resultantes da sobrecarga de rotas em redes de longa distância (ANDRADE, 2001).

2.1.2 Redes de Acesso

Nas redes de acesso, uma parte da ligação é dividida de forma a abranger várias localizações, requerendo equipamento simples. São possíveis várias topologias dependendo da tecnologia utilizada, a exemplo redes ópticas passivas, que são redes de difusão e seleção (broadcast and select) que baseiam-se num acoplador passivo em estrela que interliga várias estações numa topologia em estrela (NASCIMENTO, 2001).

2.1.3 Redes de Caminhos Ópticos

Existem diversas tecnologias que permitem realizar caminhos ópticos. São exemplos destas, a ATM, que transporta dados no formato célula/pacote, a TDM, que suporta todos os modos de transferência e a WDM, que permite o aumento da

capacidade de transmissão e flexibilidade no fornecimento de serviços. O uso da tecnologia WDM na camada física reduz o custo da transmissão pois, todo o tráfego (exceto aquele com destino ao próprio nó de origem) é encaminhado no domínio óptico usando encaminhamento no comprimento de onda, eliminando o congestionamento durante o processamento elétrico (YATES, 2001).

2.2 Tecnologias de Multiplexação

Multiplexação é o processo que permite a transmissão de dois ou mais canais de informação simultaneamente na mesma fibra. Nas fibras ópticas pode-se utilizar a multiplexação por divisão no tempo (TDM – Time Division Multiplexing), multiplexação por divisão de frequência (FDM – Frequency Division Multiplexing) e Multiplexação por divisão em comprimento de onda (WDM – Wavelength Division Multiplexing) (YATES, 2001).

2.2.1 Multiplexação – TDM

Através do método TDM (Time Division Multiplexing) a multiplexação dos sinais (voz, dados, imagem) ocorre no domínio do tempo com taxas cada vez maiores (2,5 Gbps, 10 Gbps). A multiplexação se faz com o envio sincronizado de partes dos dados. O tempo é dividido em pequenos intervalos nos quais cada fonte transmite pedaços de seus dados por vez.

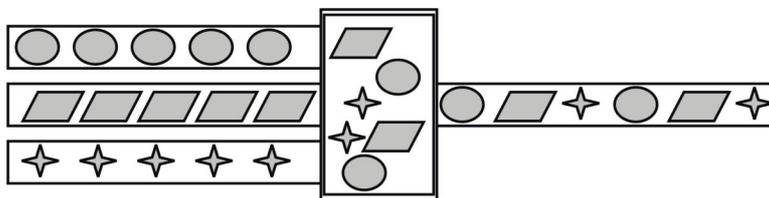


Figura 1: Multiplexação TDM.

O uso dessa técnica encontra duas limitações práticas: uma de ordem econômica, o custo elevado das partes eletrônicas e eletro-óptica (transmissores, receptores, regeneradores) para operação com taxas de transmissão acima de 2,5 Gbps; e a outra de

ordem técnica relacionada à degradação do sinal devido à dispersão e a efeitos não lineares (PINTO, 2003).

2.2.2 Multiplexação – FDM

No método FDM, vários canais de informação são multiplexados em um único canal, onde cada canal é associado a uma portadora diferente. Isto é possível com a modulação de cada canal de origem numa portadora de frequência distinta, diferente em amplitude, frequência ou fase. Cada uma das novas portadoras moduladas será referida como canal intermediário. Cada um desses canais intermediários são combinados em um canal de transmissão simples.

O resultado é um sinal composto onde cada canal é identificado como uma banda separada de frequências, cada qual identificável por uma frequência portadora discreta. No receptor, as bandas ou canais podem ser separados por meio de filtros e demoduladores associados a uma frequência portadora discreta (WIRTH, 2002).

2.2.3 Multiplexação – WDM

A WDM é a tecnologia que permite que vários sinais ópticos sejam transmitidos numa única fibra. Seu princípio é essencialmente o mesmo da multiplexação por divisão em frequência (FDM). Isto é, vários sinais são transmitidos usando diferentes portadoras, ocupando partes que não se sobrepõem no espectro de frequências. No caso de WDM, a faixa de espectro usada é a região de 1300 ou 1500nm, que são as duas janelas de comprimento de onda em que as fibras ópticas possuem baixa atenuação no sinal (WIRTH, 2002).

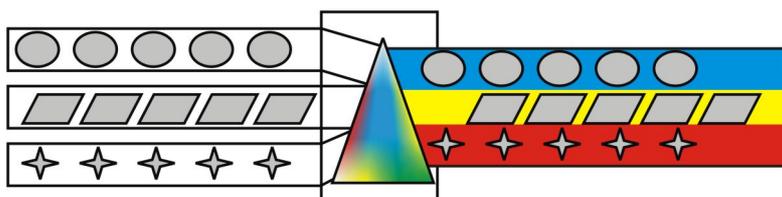


Figura 2: Multiplexação WDM.

A WDM multiplexa “cores” (comprimentos de onda) de luz em uma única fibra óptica, utilizando várias fontes de vários comprimentos de onda. Cada comprimento de onda poderá carregar sinais previamente multiplexados como, por exemplo, a TDM (WIRTH, 2002).

Tipicamente, os sistemas WDM atuais operam com diversos sinais TDM de 2,5Gbps, sendo cada um deles multiplexados por portadoras espaçadas por 2nm (SOUZA, 2002).

Basicamente, os componentes de um enlace WDM são: (SOUZA, 2002).

Lasers tipo DFB (Distributed Feedback): utilizados como transmissores, é necessário um laser para cada comprimento de onda.

Multiplexador óptico: responsável pela combinação dos sinais dos lasers para que possam ser transmitidos pela fibra.

Amplificador óptico: responsável por injetar potência óptica no sinal com a finalidade de compensar perdas no sistema.

Demultiplexadores: responsáveis pela separação de cada comprimento de onda, para que possam ser interpretados pelos receptores ópticos.

Os sinais são adicionados ao sistema através de OADMs (Optical Add/Drop Multiplexers), maiores detalhes sobre este dispositivo são apresentados nas redes de terceira geração.

2.2.4 Multiplexação – DWDM

O DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing) é uma evolução do WDM, consegue transmitir 16 ou mais comprimentos de onda, enquanto o WDM consegue transmitir somente 4. No começo, cada janela era usada para transmitir um único sinal digital. Com o avanço dos componentes ópticos, tais como os lasers DFB (distributed feedback), EDFAs (erbium-doped fiber amplifiers) e fotodetectores, logo se percebeu

que cada janela de transmissão poderia ser usada por vários sinais ópticos, cada um ocupando uma pequena fração da janela de comprimento de onda total disponível. Efetivamente, o número de sinais ópticos multiplexados dentro de uma janela é limitado apenas pela precisão dos componentes ópticos. Com a tecnologia atual, mais de 100 canais ópticos podem ser multiplexados numa única fibra. Por isso a tecnologia foi então nomeada DWDM (WIRTH, 2002).

A principal vantagem da tecnologia DWDM é o aumento que ela proporciona na utilização da largura de faixa de uma fibra. A imensa rede de fibras existente no mundo pode de repente ter sua capacidade aumentada espantosamente sem a necessidade de novas fibras. Obviamente, novos equipamentos DWDM devem ser conectados a essas fibras, além de regeneradores ópticos. (WIRTH, 2002). O conjunto de comprimento de onda usado é importante não somente para garantir a interoperabilidade, mas também para evitar que haja interferência destrutiva entre sinais ópticos. Esta tecnologia é transparente à taxa e ao formato de modulação, isto é, protocolos SDH, IP, ATM, Frame-Relay e taxas de transmissão a 622 Mbps, 2.5Gbps, 10Gbps podem ser multiplexados numa mesma fibra. Ainda, como poderá ser visto nas redes de terceira geração, com a inserção de multiplexadores Add/Drops ópticos é possível derivar e/ou inserir comprimentos de onda ao longo da fibra, introduzindo grande flexibilidade nas redes de longa distância (SOUZA, 2002).

2.2.5 Matriz de Tráfego

Uma matriz de tráfego especifica a média de tráfego entre cada par de nós em uma topologia física. Se existem N nós na rede, a matriz de tráfego é dada por $N \times N$, uma matriz $\Lambda = [\lambda^{(sd)}]$ onde $\lambda^{(sd)}$ significa a média de tráfego entre os nós s e d num período de tempo. A matriz provê, em termos numéricos, a forma como o tráfego é distribuído entre os diferentes pares origem/destino da rede, que nada mais é do que o padrão do tráfego da rede. A obtenção das médias de tráfego pode ser realizada através da mensuração da chegada de pacotes por segundo ou da quantidade de banda requerida, esta última será a métrica utilizada no desenvolvimento deste estudo (ALMEIDA, 2002).

Neste estudo, a matriz de tráfego será gerada a partir de dados obtidos dos nós roteadores de comprimentos de onda de uma rede, e estes serão armazenados em um arquivo do tipo texto. Todos os pacotes que atravessarem o nó de gerenciamento, no período de tempo de leitura, terão seus campos de origem, destino e tamanho do pacote lidos.

Para todos os efeitos, os roteadores deste estudo são do tipo ideal: possuem capacidade de comutação ilimitada, sendo capazes de sustentar o tráfego em taxa máxima, em ambos os sentidos, sem perda de pacotes.

O volume total de cada enlace da rede dependerá da combinação de clientes em cada nó roteador. A cada modificação do agrupamento dos clientes, tem-se um novo dimensionamento. O ideal seria agrupar os clientes com fluxo comum a um roteador de acesso. No entanto, nem sempre isso é possível.

O arquivo da matriz de tráfego resultante permite uma análise do tráfego da rede, e juntamente com a análise da topologia física, pode-se buscar formulações para minimizar o número de hops entre roteadores, o que resulta na maximização do *throughput* (vazão da rede) (ALMEIDA, 2002).

A tabela 1 exibe um exemplo de matriz de tráfego, com dados hipotéticos, para uma rede com 4 nós roteadores.

Tabela 1: Exemplo de matriz de tráfego.

O/D	1	2	3	4
1		0.625	0.654	0.690
2	0.350		0.954	0.751
3	0.895	0.365		0.369
4	0.665	0.521	0.369	

A primeira coluna e linha da tabela 1 representam respectivamente a origem e o destino do tráfego. Os valores variam de 0 (zero) a 1(um) determinando o peso do enlace.

2.3 Gerações das Redes Ópticas

2.3.1 Primeira Geração das Redes Ópticas

Conforme as fibras ópticas foram identificadas como meio de transmissão de alta velocidade e baixo custo, juntamente com o desenvolvimento da tecnologia fotônica, os sistemas de comunicações começaram a dispor de fibras ópticas como meio de transmissão em substituição ao par trançado. Essa revolução das fibras ópticas rapidamente fez surgir diversos padrões de transmissão, como é o caso do SONET (Synchronous Optical Network) nos Estados Unidos e SDH (Synchronous Digital Hierarqu) na Europa, além de fomentar o desenvolvimento de redes metropolitanas, a qual a FDDI (Fiber Distributed Data Interface) é uma das representantes mais conhecidas, bem como redes responsáveis pela interconexão de computadores de grande porte (CAMPELO & WALDMANN, 2000).

Nestas redes, apenas os enlaces de transmissão passaram a pertencer ao domínio óptico. Todas as tarefas de comutação, processamento e roteamento continuaram a ser desempenhadas no domínio eletrônico. Esta tecnologia está vastamente implementada nas infra-estruturas públicas de telecomunicações, em redes locais e metropolitanas. Como exemplo de alguns padrões associados a esses ambientes, pode-se citar o PDH, SONET, SDH, ATM, FDDI, IP (ALMEIDA, 2002).

2.3.2 Segunda Geração das Redes Ópticas

Nesta geração, começaram a aparecer dispositivos estáticos e passivos, com possibilidade de dividir e combinar sinais ópticos, objetivando realizar a conectividade entre transmissores e receptores ópticos sem sair dos domínios fotônicos. Estas redes ainda não possuíam a capacidade de roteamento da luz de acordo com o seu comprimento de onda. Então, para o estabelecimento de uma conexão óptica total entre todos os equipamentos integrantes, cada nó, ao receber o sinal, deveria transmiti-lo a todos os outros da rede, que precisariam de um dispositivo capaz de sintonizar um comprimento de onda específico (ALMEIDA, 2002).

As redes Broadcast and Select, como ficaram conhecidas as redes ópticas de segunda geração, possuem duas topologias mais frequentemente utilizadas, as quais fazem uso de acopladores ópticos, sendo elas: Topologia em estrela e barramento (CAMPELO & WALDMANN, 2000).

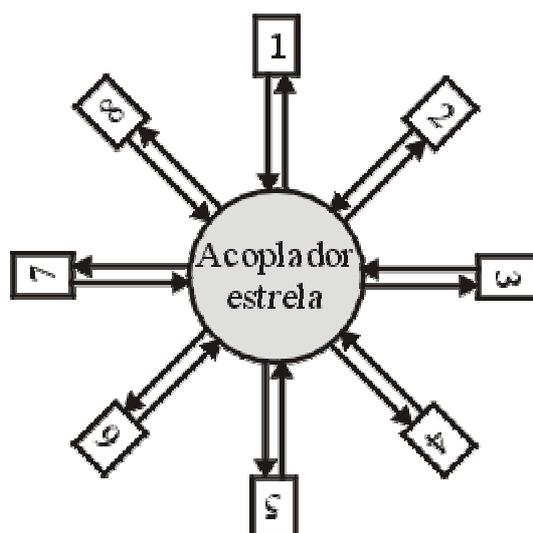


Figura 3: Rede óptica – Estrela

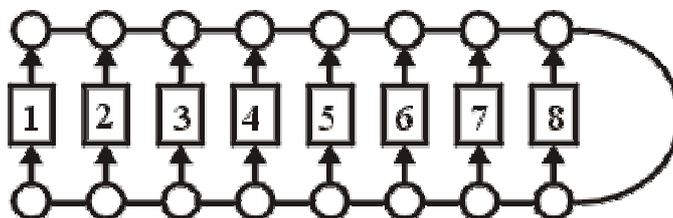


Figura 4: Rede óptica – Barramento

Essas duas topologias são as mais adequadas para esta tecnologia, uma vez que há a necessidade do compartilhamento do meio para o estabelecimento das conexões e não existe função de roteamento para que a rede seja capaz de permitir a distribuição dos sinais luminosos em todos os comprimentos de onda para todos os nós da rede (ALMEIDA, 2002).

2.3.2.1 Acopladores ópticos

Acopladores ópticos são dispositivos ópticos passivos e recíprocos, capazes de combinar e dividir a potência do sinal sem qualquer seletividade de comprimento de onda. Cada um dos nós das figuras acima (círculos), podem ser construídos com um ou mais acopladores direcionais 2x2, que são dispositivos de quatro portos, que permitem que a potência óptica proveniente de uma determinada fonte, ao entrar no acoplador mediante um dos portos de entrada, seja dividida linearmente e combinada com uma parcela do sinal provinda da outra entrada, gerando, assim, parcelas das duas entradas nas saídas do acoplador. A figura abaixo exibe um acoplador óptico 2x2 (ALMEIDA, 2002).



Figura 5: Acoplador óptico 2x2.

Cada porto de saída recebe 50% de potência de cada porto de entrada, resultando na mesma relação entrada/saída. Por exemplo, o sinal que entra pelo porto 1, tem sua potência distribuída em 50% para o porto de saída 1 e 50% para o porto de saída 2, porém é combinado com a porção que entra pelo porto 2 e sofre mesma distribuição.

É verdade que o dispositivo apresenta uma perda de espalhamento, que quando for fixa, caracteriza o dispositivo como estático; caso contrário, o dispositivo é dinâmico, . Quando o valor da razão de perda de espalhamento for $\frac{1}{2}$, a potência será dividida igualmente e o acoplador é dito ser de 3 dB, sabendo-se que a cada 3 dB a intensidade do sinal dobra, é possível realizar a divisão do sinal igualmente entre os portos.

Na topologia em barramento, (fig. 2), os nós transmitem através dos acopladores superiores, utilizando somente os portos de saída, e recebem a partir dos acopladores

inferiores, onde somente os portos de entrada são utilizados. (ALMEIDA, 2002). Dessa forma, essa topologia gera a necessidade de $2.n$ acopladores, para o estabelecimento da comunicação entre os nós da rede, sabendo-se que n é o número de nós da rede. (CAMPELO & WALDMANN, 2000). Para atingir esta mesma conectividade entre os nós da rede, utilizando-se a topologia em estrela, o arranjo deve ser realizado com a combinação de vários acopladores 2×2 , (fig. 1) formando um acoplador em estrela central. Conforme o arranjo da estrutura de Banyan, o número de acopladores necessários para a construção de um acoplador em estrela $n \times n$ é igual a $n/2 \cdot \log_2 n$, quando n for potência de 2 (CAMPELO & WALDMANN, 2000).

Este arranjo faz com que todos os sinais de todas as entradas sejam distribuídos para todos os receptores nas saídas e necessariamente atravessarão um número de acopladores igual a $\log_2 n$, sendo assim, a utilização de acopladores de 3dB é apropriada, uma vez que a potência óptica pode ser particionada igualmente para que todas as saídas recebam a mesma parcela dos sinais da rede (CAMPELO & WALDMANN, 2000).

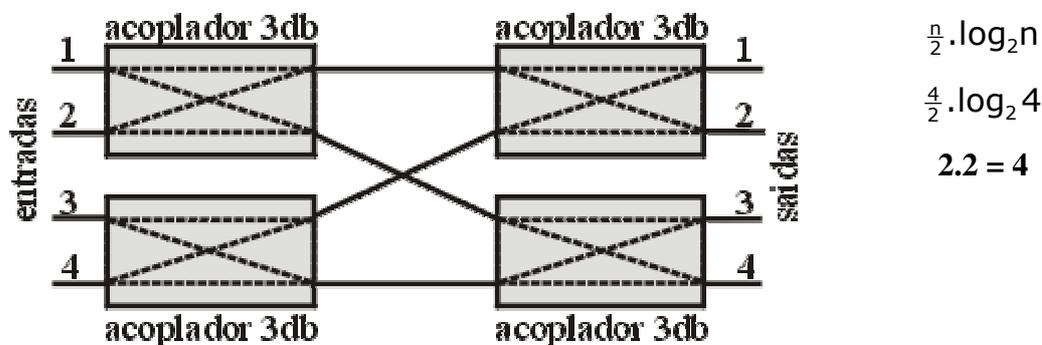


Figura 6: Acoplador óptico 4x4 para topologia em estrela.

Observa-se na figura 6 que, para uma rede com topologia em estrela com 4 nós de entrada e 4 nós de saída são necessários 4 acopladores ópticos 2×2 para a construção do acoplador óptico central, ao passo que usando a topologia em barramento seriam necessários 8 acopladores ópticos ($2 \cdot 4 = 8$) para obter-se uma rede com a mesma potencialidade. As duas redes operam como broadcast, capazes de suportar $n \cdot (n-1)$ conexões unidirecionais ponto-a-ponto entre os nós da rede. Percebe-se na topologia em

estrela, uma economia de 4 acopladores (para este exemplo), o que indica pontuação positiva para esta topologia.

A conectividade lógica entre os nós clientes de uma rede óptica com topologia em estrela estabelece-se devido a esta combinação de sinais vindos dos transmissores com destino aos receptores; porém, um nó só poderá receber informações de um outro nó cliente. Para isso, é necessário que uma estação sintonize o comprimento de onda responsável pela transmissão da informação que deseja receber (CAMPELO & WALDMANN, 2000).

A figura 7, exhibe a estrutura de uma rede broadcast and select com topologia em estrela.

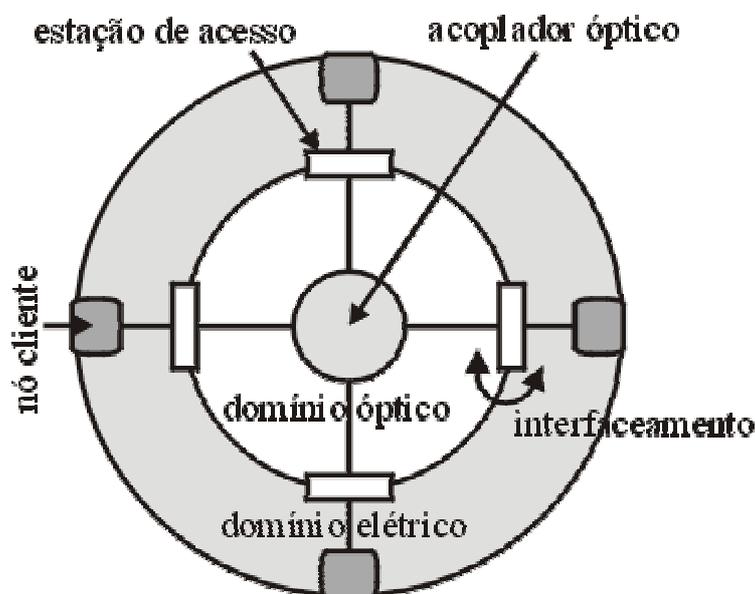


Figura 7: Topologia física em estrela – rede Broadcast and Select.

2.3.2.2 Topologias

Física

A responsabilidade da topologia física numa rede de computadores é a interligação dos nós, visualizado com a presença e disposição de componentes tais como fibras ópticas, acopladores ópticos e outros (PINTO, 2003).

Lógica

Esta topologia é a representação que descreve as conexões ativas a cada instante na rede, sem preocupar-se com a disposição dos seus dispositivos ou com o caminho virtual da informação (PINTO, 2003).

Virtual

A topologia virtual pode ser entendida como a descrição da trajetória da informação por todos os nós intermediários entre origem e destino, sendo assim, esta topologia sobrepõe-se em uma topologia física (PINTO, 2003).

As figuras 8 e 9 mostram uma representação gráfica das topologias física e virtual de uma rede óptica.

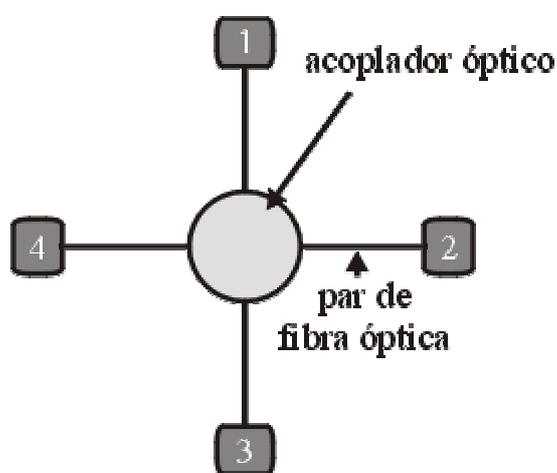


Figura 8: Topologia Física.

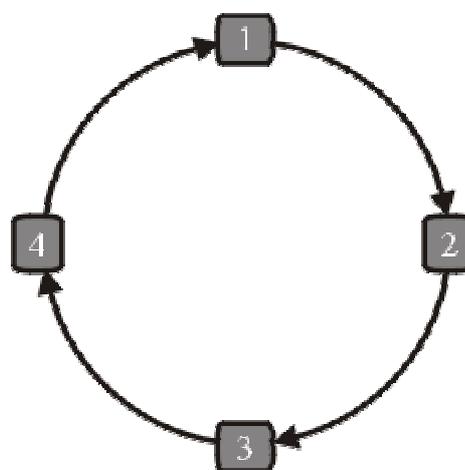


Figura 9: Topologia Virtual.

A utilização da topologia física com fotodifusão gera uma conectividade física total entre os nós. Porém, isso não significa que os nós poderão acessar informações de todos os comprimentos de onda, devido à existência de restrição no número de pares transmissores/receptores nas estações de acesso a rede, que necessitam de uma sintonia

de um conjunto de canais por vez. Ainda, no caso de um componente ter a capacidade de selecionar/sintonizar mais de um comprimento de onda, um fator limitante pode ser a velocidade de alteração de sintonia (PINTO, 2003).

Para que as redes ópticas, do tipo fotodifusão, consigam dispor uma conectividade lógica total entre os nós clientes finais, serão necessários $(n.(n-1))$ caminhos físicos, ou seja, a topologia de caminhos físicos deve composta por um conjunto de ramos, diretamente conectados a todos os pares origem-destino, não distinguindo-se da topologia lógica. Desta forma, a camada óptica da rede deverá suportar tal conectividade (PINTO, 2003).

A figura 10 representa graficamente uma rede com topologia física em estrela, utilizando transmissores e receptores fixos.

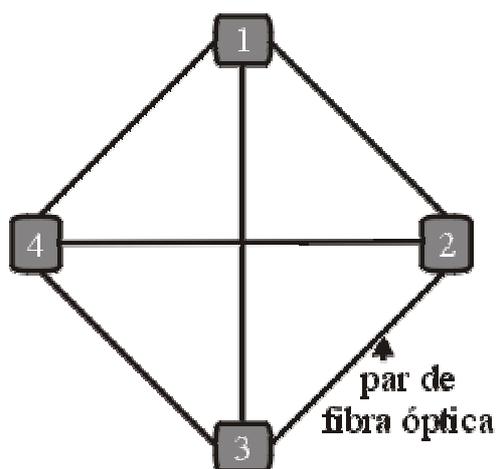


Figura 10: Topologia física com conectividade total.

Para o estabelecimento de conectividade total aos 4 nós desta rede, 12 caminhos ópticos são necessários, as informações trocadas entre os nós não saem do domínio óptico, essa característica traz a vantagem de possibilitar conexões lógicas de forma transparente, imune à modulação, taxa de bits ou protocolos. Também serão necessários 3 transceivers em cada estação de acesso a rede, uma vez que não é possível o reuso de comprimentos de onda em redes por fotodifusão, o que faz também, com que seja

necessário um comprimento de onda diferente para cada caminho físico, totalizando neste exemplo, 12 comprimentos de onda (PINTO, 2003).

Existe uma forma de reduzir a estrutura da camada física, porém mantendo conectividade total entre os nós da rede. A técnica capaz de prover isso é conhecida como *multihop* (LIMA, 2000)

A técnica *multihop* permite que as informações sejam processadas por nós intermediários entre a origem e destino. Para que isso aconteça, é necessária a inserção de nós de comutação lógica entre os nós clientes e a estação de acesso a rede (LIMA, 2000)

As figuras 11 e 12 exibem, respectivamente, uma topologia física utilizando a técnica *multihop* e um arranjo para a topologia virtual desta mesma rede.

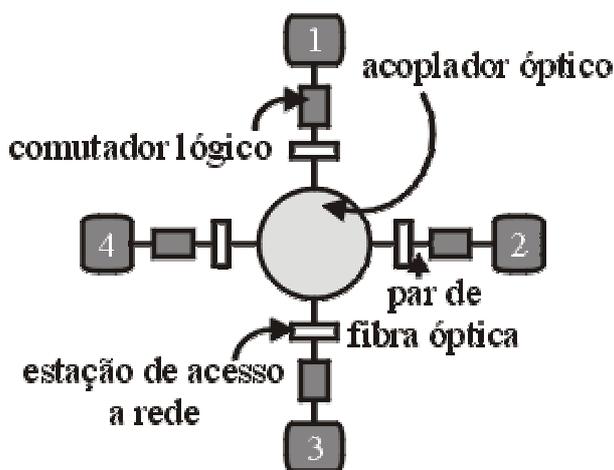


Figura 11: Topologia física com multihop.

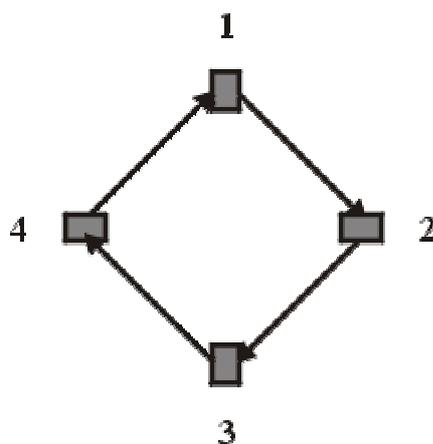


Figura 12: Topologia virtual (possível).

Pode-se observar, a partir da fig. 9 (Topologia virtual) em relação à fig. 7, a redução de 12 para 4 caminhos físicos na rede, redução de 12 para 4 comprimentos de onda na rede e redução de 3 para 1 transceivers ópticos por estação de acesso a rede.

A topologia virtual resultante deste arranjo tem a forma de anel unidirecional conectando os 4 comutadores lógicos, conseguida com o receptor do nó $(1 + i \text{ mod } 4)$ sintonizado ao transmissor do nó i , sabendo-se que $i=1,2,3,4$. Sendo assim, a camada

física necessitará de 4 caminhos físicos e o restante da responsabilidade pela conectividade total, fica a cargo da camada virtual, feita através da seleção e reenvio de pacotes/células (LIMA, 2000).

O benefício da redução de necessidades implica na perda de transparência da rede de transporte e também uma perda da capacidade total da rede, resultado do compartilhamento de caminhos físicos (LIMA, 2000).

2.3.2.3 Contenção e colisão em redes ópticas

Todos os sinais inseridos em uma rede por fotodifusão serão transmitidos para todos os nós da rede, onde cada nó selecionará o sinal desejado, ainda, uma vez que estes nós utilizam transmissores ou receptores sintonizáveis, a informação de qual comprimento de onda utilizar para transmitir ou receber se faz necessária para que as conexões possam estabelecer-se.

Isso ocorre porque se dois nós transmitirem simultaneamente usando o mesmo comprimento de onda, os sinais irão colidir e serão perdidos, caso dois nós transmitirem simultaneamente, por comprimentos de onda diferentes, mas para um mesmo destino, o sucesso da transmissão só será possível quando o nó destino possuir mais de um receptor sintonizável, do contrário, o nó poderá selecionar somente um canal, este conceito é conhecido como contenção (LIMA, 2000).

2.3.2.4 Protocolo de controle de acesso ao meio

Uma alternativa para minimizar os problemas de contenções e colisões pode ocorrer com o uso de mecanismos capazes de coordenar as transmissões e recepções da rede. A seguir existe uma descrição de alguns desses protocolos.

Muitas vezes, o serviço utilizado em um determinado comprimento de onda não necessita de toda a banda disponível para si, o que permite o compartilhamento deste canal mesmo que a transmissão seja para destinos diferentes, este tipo de

compartilhamento pode ser conseguido com multiplexação no tempo (TDM) (TDM over WDM), que consiste em dividir o comprimento de onda em *time slots* e preenchê-los com dados. Porém, existem casos em que a demanda por largura de banda é grande, nessas situações, como transmissão de vídeo de alta qualidade, um canal dedicado entre origem e destino será necessário, delegando ao protocolo de acesso ao meio somente a responsabilidade de negociação da conexão (estabelecimento e desativação) (LIMA, 2000).

Percebe-se com o exposto, obviamente, que a capacidade da rede também dependerá da capacidade hardware instalada nos nós, que podem possuir diversos transmissores e receptores sintonizáveis ou um único transmissor e receptor.

No caso de existir um único transmissor e um único receptor, há a necessidade de que pelo menos um seja sintonizável, não sendo assim, o caminho passa a ser dedicado e o protocolo de acesso ao meio somente terá a atribuição de determinar os instantes de cada transmissão. (PINTO, 2003).

A seguir serão apresentados alguns protocolos para redes ópticas WDM por fotodifusão (ALMEIDA, 2002).

Slotted Aloha on Slotted Aloha (SA/SA)

Os protocolos Aloha e Slotted Aloha foram desenvolvidos para operar em redes com um único comprimento de onda, após sofrerem adaptações para redes WDM sua implementação possui um número w de canais responsáveis pela transmissão dos dados muito menor do que o número n de nós. Cada nó precisa estar equipado com um transmissor e um receptor sintonizável que será responsável pela transmissão de dados e ainda, um transmissor e um receptor fixo, para operação em um comprimento de onda específico para controle (canal de controle). Neste modelo, o tempo é dividido em slots nos canais de dados e de controle, sendo que o slot de controle é sempre menor que o slot de dados. Pode-se apresentar duas subdivisões deste protocolo conforme segue:

Forma básica – (tell and go)

Quando um determinado nó possui um pacote de dados para ser transmitido, envia um pacote de controle no slot de controle e transmite o pacote de dados no slot de dados imediatamente subsequente ao slot de controle. O pacote de controle, enviado no comprimento de onda $w+1$, leva a identidade do nó destino de seu pacote de dados, além de especificar o comprimento de onda no qual o pacote de dados está sendo transmitido. Caso não tenha ocorrido colisão no canal, o nó destino para o pacote de dados receberá o pacote de controle e identificará em qual comprimento de onda deverá sintonizar o seu receptor para receber o pacote de dados.

O fato deste protocolo ser nomeado de tell and go acontece porque o mesmo transmite os pacotes assim que estejam disponíveis, o atraso torna-se praticamente desprezível, fato este, importante para as redes ópticas, caso esta característica não estivesse embutida neste protocolo, haveria a necessidade de buffers de alta capacidade.

Forma modificada – (wait and see)

Este protocolo procura resolver a dispendiosa transmissão de pacotes de dados incapazes de serem recebidos em decorrência de colisões sofridas pelos seus correspondentes pacotes de controle. Agora, o pacote de dados é enviado somente após o correspondente pacote de controle ter sido recebido pelo destino, caso ocorra colisão a transmissão será cancelada a fim de evitar o congestionamento da rede.

Desta forma, ocorre um aumento do throughput da rede, em detrimento a um aumento no atraso de acesso decorrente do modelo tell-and-go.

DT-WDMA

Este protocolo também possui a característica tell-and-go, porém, a implementação do DT-WDMA foi direcionada às redes ópticas com múltiplos

comprimentos de onda. Este protocolo requer que cada nó esteja equipado com um transmissor fixo, um receptor sintonizável e um par Tx/Rx para o canal de controle.

Toda vez que um nó possuir um pacote de dados para enviar, ele primeiramente transmite, no slot de controle reservado a si, um pacote de controle, para que só então seja feita a transmissão do pacote de dados no slot de dados imediatamente seguinte (ANDRADE, 2001).

A informação transportada pelo pacote de controle conterá apenas a identificação do nó destino, a posição deste pacote dentre os slots de controle implicitamente informa qual o nó e comprimento de onda responsável pela transmissão do pacote de dados enviado.

Este protocolo, trabalhando desta forma, consegue eliminar o problema das colisões, uma vez que cada nó transmite os pacotes de dados num comprimento de onda diferente e os pacotes de controle em slots de controle diferentes. O problema da contenção não fica totalmente resolvido, quando acontece, o nó receptor utiliza um algoritmo responsável pela solução de contenções e determina qual pacote irá receber.

Scheduling

A diferença básica deste protocolo em relação ao DT-WDMA é que cada nó, após ter enviado o pacote de controle, deverá aguardar o tempo suficiente para recebê-lo, tal que, com o conhecimento de todos os pacotes de controle recebidos em um dado intervalo de tempo, possam trabalhar em conjunto utilizando um determinado algoritmo que agende as transmissões destinadas a um mesmo receptor em diferentes slots de dados, de modo que não haja contenção nos receptores (ANDRADE, 2001).

2.3.3 Terceira Geração

Nesta geração, o roteamento por comprimento de onda emerge da necessidade de escalabilidade da rede, uma vez que as redes de segunda geração possuíam um

espalhamento da potência óptica entre todos os receptores, que impossibilitava o reuso espacial dos comprimentos de onda.

A figura a seguir permite a visualização de uma rede óptica com roteamento por comprimento de onda.

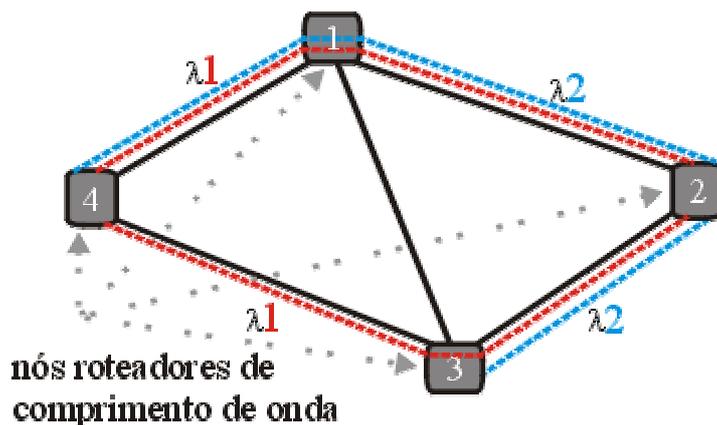


Figura 13: Topologia Física de uma rede óptica.

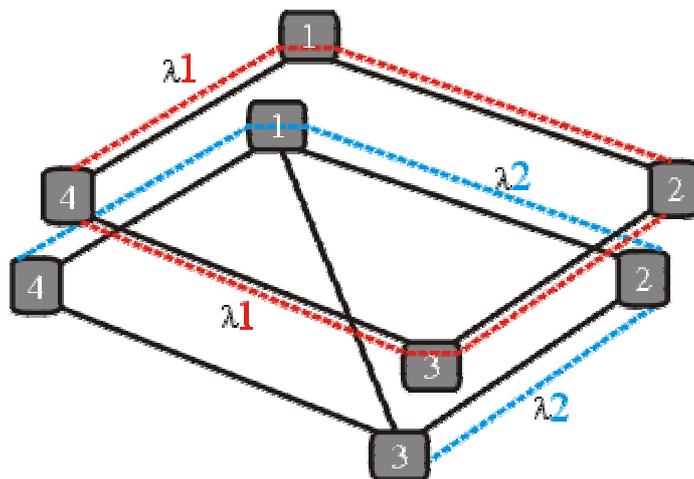


Figura 14: Modelo esquemático em camadas de uma rede WDM.

A figura 14 exibe um modelo esquemático para visualizar a topologia física de uma rede com roteamento por comprimento de onda. Sendo que para cada comprimento

de onda, λ_1 e λ_2 , foi criada uma cópia da rede. No exemplo apresentado, a topologia virtual pode ser vista com três ligações entre os nós 4 e 2 utilizando os comprimentos de onda λ_1 e λ_2 , e uma ligação entre os nós 3 e 2 utilizando o comprimento de onda λ_2 .

As redes com roteamento por comprimento de onda permite o reuso dos comprimentos de onda desde que não compartilhem um mesmo enlace, (ALMEIDA, 2002), é o que acontece no exemplo apresentado, a figura 13 apresenta três conexões entre os nós 4 e 2, porém percebe-se que as duas conexões que utilizam o comprimento de onda λ_1 não compartilham o mesmo enlace. Ainda, no caso de novas requisições de conexões, uma possibilidade seria, por exemplo, para uma conexão entre os nós 1 e 3, a utilização de qualquer comprimento de onda, uma vez que este enlace não está ocupado por qualquer comprimento de onda.

Assim, percebe-se como uma das principais diferenças entre a segunda e terceira geração de redes, o tratamento adicional do sinal em nível fotônico que acontece na terceira geração. Apresentou-se, anteriormente, que o número de comprimentos de onda necessários para a conexão de 4 nós em uma rede de segunda geração era igual a 14, a figura 15 mostra a diferença de necessidades de comprimentos entre as duas gerações.

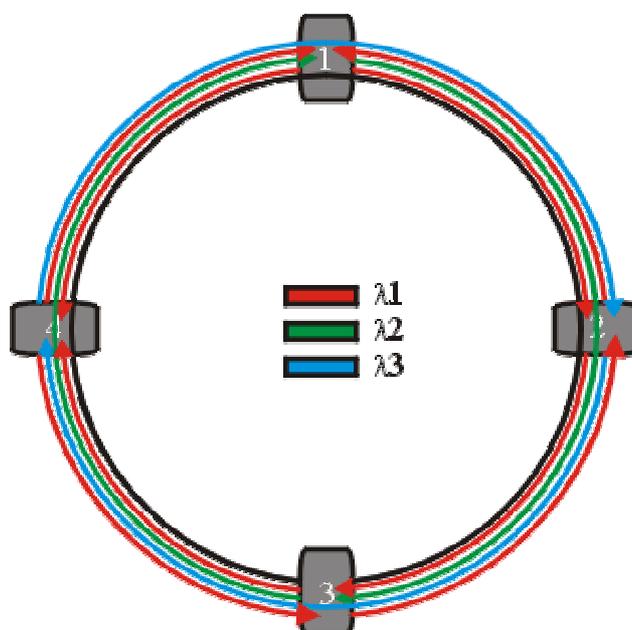


Figura 15: Topologia física do anel bidirecional com comprimentos de onda.

Tabela 2: Tabela de roteamento e atribuição de comprimentos de onda.

	Nó 1	Nó 2	Nó 3	Nó 4
Nó 1		λ_1 sa	λ_2 as	λ_1 sh
Nó 2	λ_1 sh		λ_1 sa	λ_3 sa
Nó 3	λ_2 sh	λ_1 sh		λ_1 sa
Nó 4	λ_1 sa	λ_3 sh	λ_1 sh	

A aplicação de um determinado algoritmo de alocação de rota e comprimento de onda, implica na obtenção de uma tabela de roteamento e alocação semelhante a apresentada acima, onde λ_n significa o comprimento de onda que será alocado e onde $s(a$ ou $h)$ significa o sentido que o sinal percorrerá, (anti-horário ou horário), neste caso específico, o algoritmo possui como definição a alocação de rota pelo menor caminho (menor número de enlaces) não se importando com o volume de tráfego existente entre os nós origem e destino. Um algoritmo com estas características é o SMLTDA (Single-Hop Maximization Logical Topology Design Algorithm) (DA CUNHA, 2003).

A tabela 1 mostra que a conectividade total de uma rede de 4 nós (12 conexões lógicas) necessita de 3 comprimentos de onda (λ). Desta maneira, é possível perceber a vantagem sobre os 12 comprimentos de onda necessários para uma rede por fotodifusão single-hop.

Esta necessidade por comprimentos de onda ainda poderia ser minimizada, utilizando-se somente 1 comprimento de onda. Isto é possível de ser realizado passando a função de processamento das informações para os domínios elétricos e gerando uma rede multihop sobre a rede óptica.

De acordo com Cunha (2003), o aumento da capacidade da rede torna-se possível e vantajoso, quando o número de caminhos ópticos possíveis é maior que o número de comprimentos de onda disponíveis; isto acarreta uma alta escalabilidade às redes com roteamento no nível fotônico (DA CUNHA, 2003).

Uma das grandes vantagens do roteamento de comprimento de onda é a possibilidade de reutilizá-los livremente no espaço.

Características das redes de Terceira Geração

De acordo com Lima (2003), as redes de terceira geração apresentam três principais características: transparência, confiabilidade e comutação por circuitos.

Transparência: Os dados podem ser transportados em uma variedade de taxas, protocolos e formatos. É possível que um caminho óptico transporte tráfego SONET ou SDH enquanto outros transportem tráfego ATM ou IP.

Confiabilidade: Com a presença de roteamento na camada óptica, esta poderá ser configurada tal que, na ocorrência de falhas, consiga re-rotear automaticamente seus caminhos ópticos por rotas alternativas. Além disso, muitos de seus componentes, tais como multiplexadores e demultiplexadores são passivos e, por isso, menos susceptíveis a falhas.

Comutação por circuito: Prover caminhos ópticos é função das redes de terceira geração, estas podem ativar ou desativar os caminhos ópticos de acordo com a demanda da rede, a comutação de pacotes não é compromisso da camada óptica, mas sim das camadas superiores, que podem ser por exemplo ATM ou IP.

2.4 Conclusão

Neste capítulo, após a apresentação de tecnologias e recursos utilizados nas redes ópticas, apresentou-se que o nível de processamento e roteamento eletrônico foi diminuindo em cada geração. Isto ocorreu pelas constantes tentativas do aproveitamento da capacidade de transmissão fornecida pelas fibras ópticas, permitindo o transporte de sinais heterogêneos na mesma fibra e uma comunicação cada vez mais embutida no domínio fotônico.

Logo na primeira geração, onde somente os enlaces de transmissão passaram a pertencer ao domínio óptico, percebeu-se que o gargalo estava no nível eletrônico; então, os estudos começaram a convergir para o domínio fotônico, resultando no aparecimento de novos padrões de comunicação para redes de grande porte.

Quando os equipamentos das pontas foram focados, passou-se para a segunda geração da redes ópticas. Nesta etapa, dispositivos estáticos e passivos com divisão e combinação de sinais ópticos começam a fazer parte das redes. Porém, todos os nós deveriam sintonizar um comprimento de onda específico para estabelecer a comunicação, fato solucionado pela terceira geração, com a introdução do roteamento dos comprimentos de onda, que permite a reutilização dos comprimentos de onda, solucionando a necessidade de escalabilidade da rede.

No próximo capítulo apresenta-se os conceitos e características de equipamentos utilizados na instalação de redes ópticas.

3 COMPONENTES DE UM SISTEMA ÓPTICO

Este capítulo descreve os conceitos e as características de equipamentos utilizados na instalação de redes ópticas, bem como a forma que estes componentes operam, de forma que sirva como um instrumento ao entendimento da aplicação das tecnologias apresentadas até então, e de embasamento para o sistema apresentado nos próximos capítulos.

3.1 Fibras Ópticas

A fibra óptica nada mais é que um pedaço de “vidro” (sílica pura) em forma de fibra utilizada para conduzir luz de um ponto a outro. A fibra é constituída por dois tipos de “vidros” de forma que a luz incidente em uma de suas extremidades fique aprisionada em seu interior, como mostra a figura 16. Esta propriedade de aprisionamento da luz se deve à reflexão interna total que ocorre, sob certas condições, quando a luz passa de um meio com índice de refração maior (no caso o núcleo da fibra, n_1) para outro com índice de refração menor (no caso a casca da fibra, n_2). O índice de refração é a razão entre a velocidade da luz no vácuo e a velocidade da luz no meio (SOUZA, 2002).

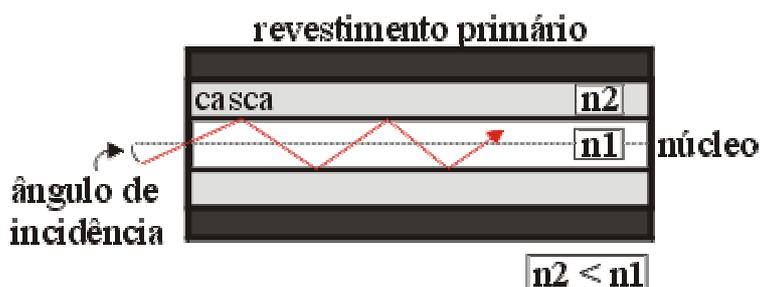


Figura 16: Reflexão interna total (SOUZA, 2002).

O princípio pelo qual a luz se propaga na fibra óptica é fundamentado na reflexão total da luz, quando um raio de luz se propaga em um meio cujo índice de refração é n_1 (núcleo) e atinge a superfície de outro meio com índice de refração n_2 (casca), onde $n_2 < n_1$ e, desde que o ângulo de incidência em relação a normal seja maior ou igual ao

ângulo crítico, ocorrerá o que é denominado de reflexão total, do que resulta o retorno do raio de luz ao meio com índice de refração n_1 (SOUZA, 2002).

Isto sabido, a luz é inserida em uma das extremidades da fibra sob um cone de aceitação, em que este determina o ângulo por que o feixe de luz deverá ser inserido, para que possa se propagar ao longo da fibra (SOUZA, 2002).

Existem basicamente dois tipos de fibras ópticas, as multimodo, que possuem vários modos de propagação, onde os raios podem percorrer o interior da fibra por diversos caminhos e as fibras monomodo, que possuem um único modo de propagação, nesta, os raios de luz percorrem o interior da fibra por um só caminho.

3.1.1 Atenuação da fibra óptica

A luz que se propaga pela fibra óptica perde parte da potência devido a absorção de luz na casca e imperfeições da sílica dentro da fibra (ex.: metais pesados inseridos na fabricação). Mede-se a atenuação em dB/Km. Para melhor aplicação da tecnologia óptica, as chamadas janelas ópticas nas faixas de 850nm, 1300nm, 1310 e 1550nm são utilizadas, isto ocorre devido a baixa atenuação do sinal nestas regiões (SOUZA, 2002).

A figura 17, abaixo, exhibe a forma de manifestação da atenuação numa fibra óptica. Nela percebe-se, em determinadas janelas, uma baixa atenuação, onde se pode obter vantagens de largura de banda e distância máxima do enlace óptico, quando exploradas corretamente pelos elementos transmissores e receptores.

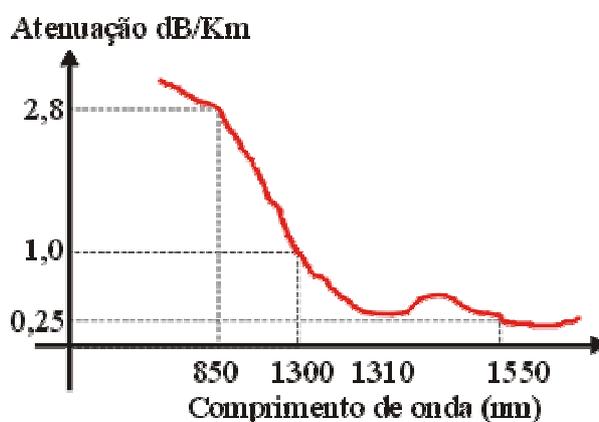


Figura 17: Janelas ópticas (SOUZA, 2002).

É importante ressaltar que as janelas 850nm e 1300nm são utilizadas para a transmissão de dados, enquanto as janelas 1310nm e 1550nm são utilizadas para a telefonia e CATV (SOUZA, 2002).

3.1.2 Dispersão da fibra óptica

A limitação da largura de banda do sinal transmitido é fruto da dispersão. Na comunicação óptica onde os sinais digitais são mais freqüentemente utilizados, a dispersão significa um alargamento temporal do pulso óptico, resultado na superposição de diversos pulsos do sinal. A diferença entre a largura do pulso de entrada e o pulso correspondente do sinal de saída é conhecido como dispersão de pulso (SOUZA, 2002).

3.1.3 Modulação óptica

Para transmitir dados através de uma fibra óptica, a informação deve primeiro ser codificada, ou modulada dentro do sinal laser. O sinal é transmitido não em sua forma original, mas com uma mudança de amplitude, freqüência ou fase, por meio de uma portadora, modulação de portadora é o nome determinado ao processo de variação do sinal em amplitude, freqüência ou fase. O tipo de transmissão que utiliza esta técnica é denominado transmissão analógica (SOUZA, 2002).

Para a transmissão digital o sinal é comutado entre dois níveis de potência. O nível mais baixo representa um bit “0”, enquanto que o nível mais alto representa um bit “1”. Assim, em sistemas ópticos digitais, um pulso pode ser representado por uma rajada (burst) de luz na fibra e pela ausência de um burst de luz nesta (SOUZA, 2002).

3.2 Lasers

O laser (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) é responsável pela geração dos sinais ópticos a serem transmitidos num sistema óptico. Isso é feito

através da emissão estimulada de fótons, que é o que permite ao laser produzir intensos feixes de alta potência de luz coerente (luz que contém uma ou mais frequências distintas) (NASCIMENTO, 2001).

3.2.1 Características dos Lasers

A capacidade de sintonizar diferentes comprimentos de onda é um ponto relevante na escolha do laser a ser usado em redes WDM. Algumas das características físicas dos lasers que podem afetar a performance do sistema são a largura de linha do laser, a sua estabilidade em frequência e o número de modos longitudinais.

A largura de linha do laser é a largura espectral da luz gerada. A largura de linha afeta o espaçamento dos canais e também afeta a quantidade de dispersão que ocorre quando a luz está se propagando ao longo da fibra. Esse efeito de dispersão limita a taxa máxima de transmissão de bit.

A instabilidade de frequência nos lasers são variações na frequência do laser. Nos sistemas WDM, a instabilidade de frequência pode limitar a posição e o espaçamento entre canais.

O número de modo longitudinais em um laser é o número de comprimentos de onda que ele pode amplificar. Para lasers que consistem de uma simples cavidade, os comprimentos de onda que serão amplificados serão aqueles cujos múltiplos inteiros são iguais a duas vezes o comprimento da cavidade ($n\lambda=2L$). Os modos indesejados produzidos por um laser podem resultar numa dispersão significativa, portanto é desejável que se implemente lasers com apenas um único modo longitudinal.

Algumas características primárias de interesse para lasers sintonizáveis são a faixa de sintonia (tuning range), o tempo de sintonia (tuning time), e se o laser é sintonizável continuamente (sobre a sua faixa de sintonia) ou discretamente (somente para comprimento de ondas selecionados). A faixa de sintonia corresponde a faixa de comprimentos de onda sobre a qual o laser pode ser operado. O tempo de sintonia

especifica o tempo necessário para o laser sair de uma frequência de sintonia para outra (NASCIMENTO, 2001).

3.3 Fotodetectores

Nos receptores que empregam detecção direta, um fotodetector converte o feixe de fótons que chega num feixe de elétrons (corrente elétrica). Essa corrente é então amplificada e passada através de um dispositivo comparador. Um bit lógico é “0” ou “1” se a corrente está abaixo ou acima de um certo limiar durante a duração do bit. Assim, a decisão é feita baseada no fato de haver ou não luz na duração do bit.

Outra alternativa de detecção é a detecção coerente. Nela, a informação de fase é usada na codificação e na detecção de sinais. Os receptores baseados em detecção coerente utilizam um laser monocromático como oscilador local. O feixe óptico que chega, que está numa frequência ligeiramente diferente da frequência do oscilador, é combinado com o sinal do oscilador, resultando num sinal de frequência diferente. Este sinal resultante, que é um sinal na faixa de microondas, é amplificado e então fotodetectado. A detecção coerente permite a recepção de sinais fracos em meios onde o ruído é significativo. Entretanto, em sistemas ópticos é difícil manter a informação de fase requerida para a detecção coerente (NASCIMENTO, 2001).

3.4 Amplificadores ópticos

Embora o sinal óptico possa se propagar através de uma longa distância, ele precisa antes ser amplificado. A amplificação totalmente óptica pode diferir da amplificação opto-eletrônica, pois ela pode aumentar apenas o nível de potência do sinal, ao invés de restaurar também a forma de onda e o relógio do sinal. Este tipo de amplificação é conhecido como 1R (regeneration), e proporciona total transparência nos dados (o processo de amplificação é independente do formato de modulação do sinal óptico). A amplificação 1R está emergindo como a escolha para as redes totalmente ópticas de amanhã. Entretanto, nas redes atuais (ex. Synchronous Optical Network

(SONET) e Synchronous Digital Hierarchy (SDH)), que usam a fibra óptica apenas como meio de transmissão, os sinais ópticos são primeiro convertidos para sinais eletrônicos para, em seguida, serem amplificados e retransmitidos na forma óptica. Uma amplificação desse tipo é chamada de 3R (regeneration, reshaping, reclocking). Contudo, a técnica 3R proporciona uma menor transparência do que a técnica 1R, o que é um fator essencial a considerar nas futuras redes ópticas.

Em sistemas WDM com sistema de amplificação eletrônica, cada comprimento de onda necessita ser separado antes de ser amplificado eletronicamente, e então recombinado antes de ser retransmitido. Assim, para eliminar a necessidade de multiplexadores e demultiplexadores ópticos, faz-se necessário que os amplificadores ópticos aumentem a força do sinal óptico sem convertê-lo para sinais na forma elétrica. Um inconveniente disso é que o ruído óptico também será amplificado junto com o sinal. Além disso, o amplificador também introduz uma emissão espontânea de ruído.

A amplificação óptica usa o princípio da emissão estimulada, assim como o laser. Existem dois tipos básicos de amplificadores ópticos: amplificador laser semicondutor e amplificador a fibra dopada (NASCIMENTO, 2001).

3.5 Elementos de Comutação

Várias redes empregam atualmente o processamento eletrônico e utilizam a fibra óptica apenas como meio de transmissão. A comutação e o processamento dos dados são executados convertendo-se primeiramente o sinal óptico para a sua forma eletrônica. Dessa forma a rede utiliza switches eletrônicos. Esses switches proporcionam um elevado grau de flexibilidade em termos de funções de comutação e de roteamento; entretanto a velocidade da eletrônica é incapaz de explorar a elevada taxa de transmissão que uma fibra óptica permite. Além disso, uma conversão eletro-óptica num nó intermediário da rede introduz um atraso adicional.

Esses fatores têm sido a razão para um grande esforço que está sendo realizado na busca de se desenvolver redes totalmente ópticas nas quais os componentes de comutação estão aptos a comutar seqüências de dados ópticos, em elevadas taxas de

transmissão, sem efetuar a conversão eletro-óptica. Na classe de dispositivos de comutação que estão atualmente sendo desenvolvidos, o controle da função de comutação é executado eletronicamente, com a seqüência de dados ópticos sendo transparentemente roteada de uma dada porta de entrada do switch para uma dada saída. Uma comutação transparente permite que o switch seja independente da taxa de dados e do formato dos sinais ópticos. Para os sistemas WDM, estão sendo também desenvolvidos switches que são dependentes do comprimento de onda (NASCIMENTO, 2001).

Os switches podem ser divididos em duas classes. A primeira classe é chamada de “dispositivos relacionais”, e recebe esse nome, porque os switches, que pertencem a essa classe, apresentam uma relação entre as suas entradas e as suas saídas. A relação é uma função dos sinais de controle aplicados ao dispositivo e é independente do conteúdo do sinal ou dos dados de entrada, ou seja, a informação que trafega através desses dispositivos não interfere na relação entre as entradas e as saídas. Essa característica proporciona “transparência aos dados”.

A segunda classe de dispositivos é chamada de “dispositivos lógicos”. Em dispositivos desse tipo, tanto os dados quanto a informação transportada pelo sinal que incide no dispositivo controlam o estado do mesmo, de modo que uma função booleana ou uma combinação de funções booleanas é executada nas entradas. A capacidade que algumas seqüências de dados possuem de mudar o estado do dispositivo permitem que sejam acrescentadas funcionalidades adicionais, mas por outro lado limitam a taxa máxima de transmissão de bits.

Pode-se concluir, a partir do que foi dito anteriormente, que os “dispositivos relacionais” são necessários para a comutação de circuitos, enquanto que os “dispositivos lógicos” são necessários para a comutação de pacotes (CAMPELO & WALDMANN, 2000).

A seguir apresenta-se uma breve descrição de alguns elementos e arquiteturas de comutadores ópticos.

3.6 Elementos Interconectores de Fibras

Um elemento interconector de fibra comuta sinais ópticos de portas de entrada para portas de saída. Esses tipos de elementos são geralmente considerados como sendo insensíveis ao comprimento de onda, isto é, eles não são capazes de demultiplexar sinais de diferentes comprimentos de onda numa dada fibra de entrada (SOUZA, 2002).



Figura 18: Elementos interconectores 2x2 (WIRTH, 2002).

Observa-se na Figura 18, um elemento básico de interconexão. Ele roteia sinais ópticos de duas portas de entrada para duas portas de saída: neste modelo tem-se dois estados possíveis, “cross state” e “bar state”. No primeiro, o sinal da porta de entrada superior é roteado para a porta de saída inferior e o sinal da porta de entrada inferior é roteado para a porta de saída superior. No segundo, o sinal da porta de entrada superior é roteado para a porta de saída superior e o sinal da porta de entrada inferior é roteado para a porta de saída inferior.

3.9 Roteadores de comprimentos de onda não reconfiguráveis.

Um dispositivo de roteamento de comprimento de onda pode rotear sinais em diferentes fibras de entrada (portas) no dispositivo para diferentes fibras de saídas (portas) baseado no comprimento de onda dos sinais.

O roteamento de comprimento de onda é efetuado da seguinte forma: primeiro os diversos comprimentos de onda de cada porta de entrada são demultiplexados, depois eles podem ser opcionalmente comutados separadamente e em seguida são multiplexados em cada porta de saída. O dispositivo pode ser reconfigurável ou não.

Nos dispositivos não reconfiguráveis, não há um estágio de comutação entre os demultiplexadores e os multiplexadores, e as rotas para os diferentes sinais que chegam em qualquer porta de entrada são fixadas. Nos dispositivos reconfiguráveis, a função de roteamento do switch pode ser controlada eletronicamente.

Um roteador de comprimento de onda não reconfigurável pode ser construído com um estágio de demultiplexadores que separam cada um dos comprimentos de onda numa fibra que chega, seguido de um estágio de multiplexadores que recombina os comprimentos de ondas das várias entradas numa única saída. As saídas dos demultiplexadores estão ligadas às entradas dos multiplexadores como mostra a figura 19, abaixo (CAMPELO & WALDMANN, 2000).

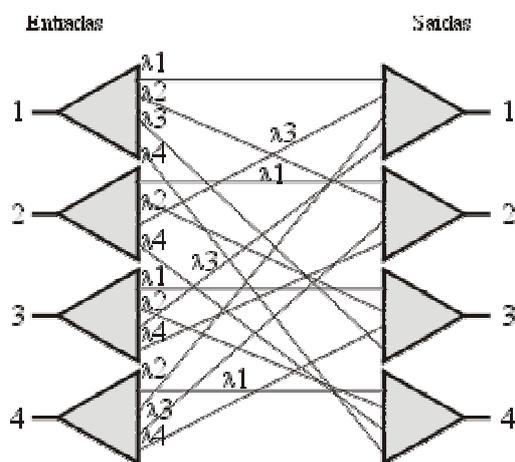


Figura 19: Roteador 4x4.

3.10 Roteadores Reconfiguráveis

Os roteadores reconfiguráveis possuem algumas vantagens sobre os não reconfiguráveis. A sua matriz de roteamento pode ser reconfigurada sobre controle eletrônico. Entretanto o roteador reconfigurável necessita de alimentação e não é tolerante a falhas como são os roteadores não reconfiguráveis. A figura 20 ilustra um roteador reconfigurável.

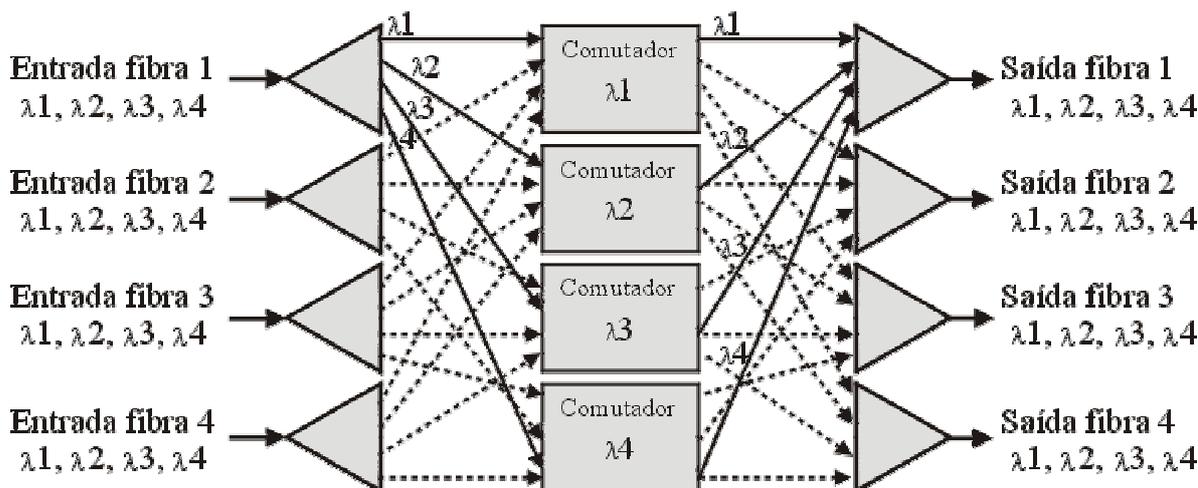


Figura 20: Roteador reconfigurável 4x4 (WIRTH, 2002).

3.11 Conversão de comprimento de onda

A figura abaixo exibe uma rede roteada por comprimentos de onda que contém dois interconectores WDM (S1 e S2) e cinco estações de acesso (A até E).

Foram estabelecidos três caminhos de luz (lightpaths), C para A no comprimento de onda λ_1 , C para B em λ_2 e D para E em λ_1 . Para estabelecer um caminho de luz, é preciso que o mesmo comprimento de onda seja alocado em todo o trajeto do caminho. Este requisito é conhecido como “restrição na continuidade do comprimento de onda”.

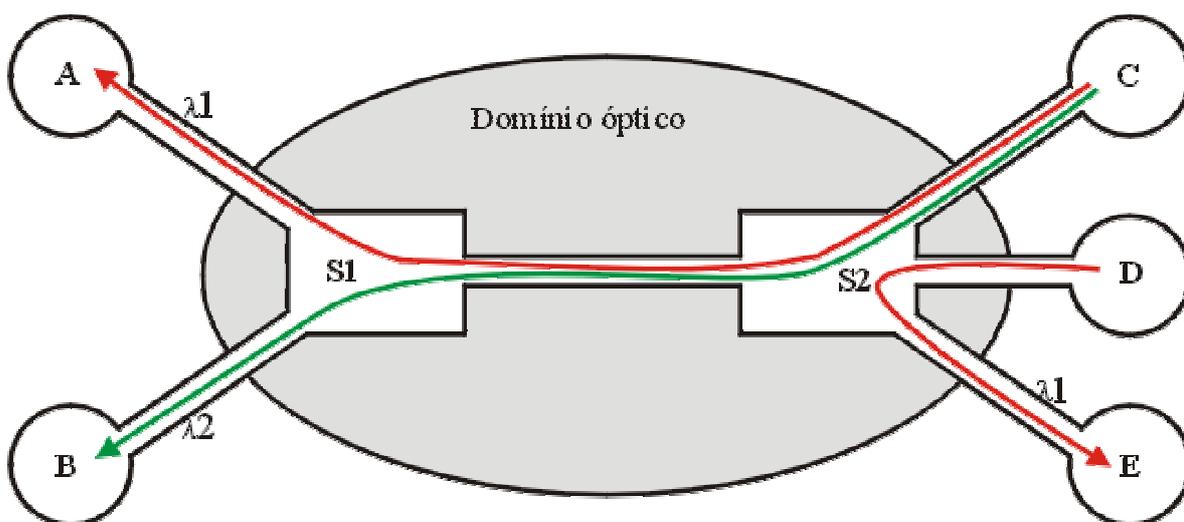


Figura 21: Rede óptica roteada em comprimento de onda (WIRTH, 2002).

Na figura 22 foram estabelecidos dois caminhos de luz na rede:

- a) entre o Nó 1 e Nó 2 no comprimento de onda λ_1 , e
- b) entre o Nó 2 e Nó 3 no comprimento de onda λ_2 .

Agora, supondo-se que se deseja estabelecer um caminho de luz entre o Nó 1 e o Nó 3. Tal caminho é impossível de ser estabelecido mesmo se houvesse um comprimento de onda livre em cada um dos enlaces ao longo do caminho que vai do Nó 1 ao Nó 3. Isto acontece porque os comprimentos de onda disponíveis nos dois enlaces são diferentes.

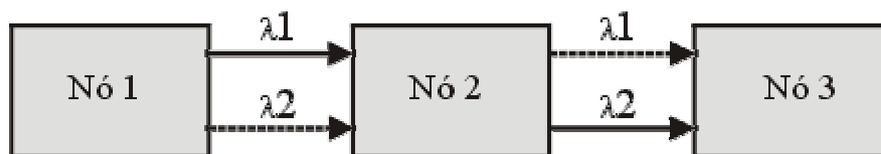


Figura 22: Restrição de continuidade do comprimento de onda (WIRTH, 2002).

É possível eliminar o problema da “restrição de comprimento de onda”; para isso é preciso converter os dados que chegam num determinado comprimento de onda ao longo de um enlace para outro comprimento de onda num nó intermediário e enviá-lo para o próximo enlace. Essa técnica é chamada de “conversão de comprimento de onda”. Com isso um único caminho de luz pode usar um comprimento de onda diferente em cada enlace do caminho. (CAMPELO & WALDMANN, 2000). A figura 23 ilustra esta técnica.

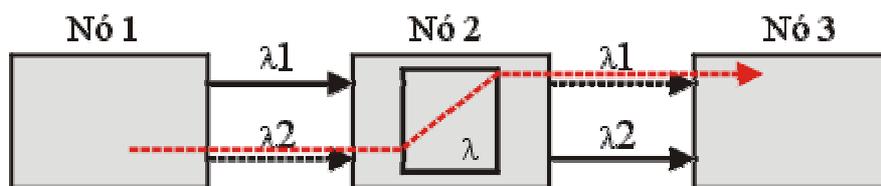


Figura 23: Restrição de continuidade do comprimento de onda (WIRTH, 2002).

A função de um conversor de comprimento de onda é converter dados de um determinado comprimento de onda de entrada para um possível comprimento de onda diferente de saída entre os “n” comprimentos de onda no sistema (CAMPELO & WALDMANN, 2000).

3.12 Tecnologias de conversão de comprimento de onda

As técnicas de conversão de comprimento de onda podem ser classificadas em dois tipos: “conversão de comprimento de onda opto-eletrônica”, na qual o sinal óptico deve primeiro ser convertido num sinal eletrônico e “conversão de comprimento de onda totalmente óptica”, na qual o sinal permanece no domínio óptico. As técnicas de conversão totalmente ópticas podem ainda serem subdivididas nas técnicas que empregam “efeitos coerentes” e nas técnicas que usam “modulação cruzada” (YATES & RUMSEWICZ, 1999).

3.13 Multiplexador de inserção/remoção de comprimentos de onda - WADM

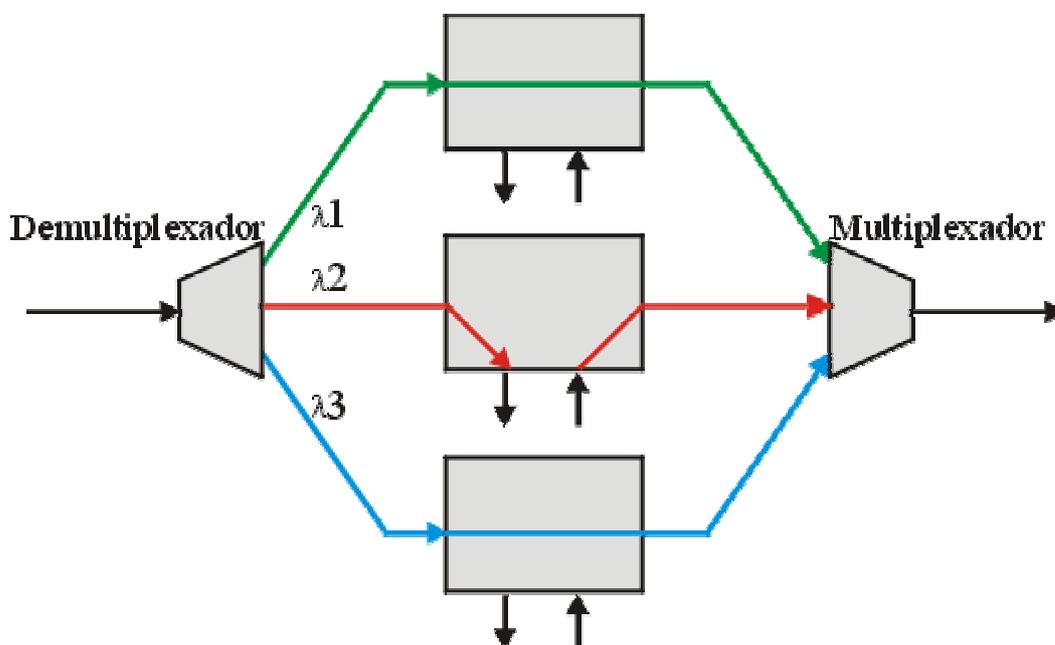


Figura 24: WADM (Multiplexador de inserção e exclusão de comprimento de onda) (WIRTH, 2002).

WADM é a sigla em inglês para (Waveleght Add/Drop Multiplexer). Um WADM consiste de um demultiplexador, seguido de um conjunto de 2x2 switches – um switch por comprimento de onda – seguido de um multiplexador. O WADM pode ser essencialmente inserido num enlace físico de fibra. Se todos os 2x2 switches estão no “bar state”, então todos os comprimentos de onda fluirão através do WADM sem serem perturbados. Entretanto, se um dos 2x2 switches estiver configurado no “cross state” via controle eletrônico, então o sinal no comprimento de onda correspondente é “largado” (DROP) localmente e, uma nova seqüência de dados pode ser adicionada no mesmo comprimento de onda neste ponto do WADM. Mais de um comprimento de onda pode ser “excluído e adicionado” se a interface WADM tem o hardware e a capacidade de processamento necessários (YATES & RUMSEWICZ, 1999).

3.14 Redes de Transporte Óptico

Redes WDM são construídas conectando-se nós WXC (wavelength cross connect) numa dada topologia. WXCs são construídos a partir de multiplexadores e demultiplexadores de comprimento de onda, de switches e de conversores de comprimento de onda. Os sinais ópticos, multiplexados na mesma fibra, chegam num demultiplexador óptico. O sinal é decomposto em várias portadoras de comprimento de onda e enviado para um conjunto de switches ópticos. Os switches ópticos roteiam os vários sinais nos seus comprimentos de onda respectivos para um conjunto de multiplexadores de saída, onde os sinais são multiplexados e injetados nas fibras de saída para a transmissão. Os conversores de comprimento de onda podem ser usados entre o switch óptico e os multiplexadores de saída a fim de proporcionar mais flexibilidade de roteamento (YATES & RUMSEWICZ, 2001).

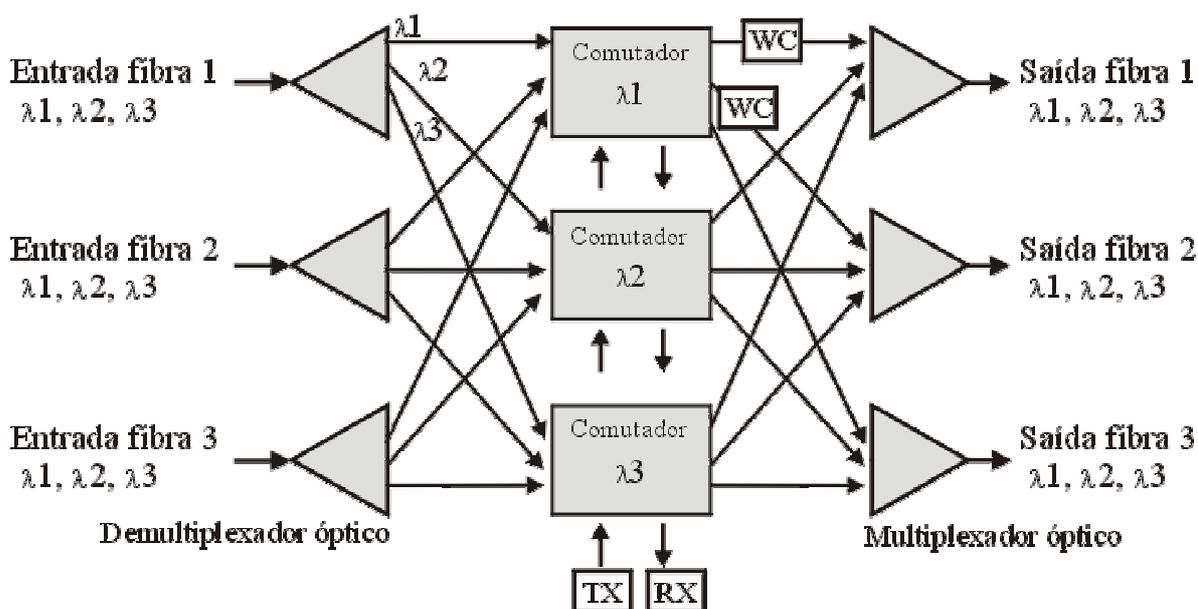


Figura 25: Nó de interconexão de comprimento de onda (WIRTH, 2002).

As redes de transporte ópticas (OTNs) são redes WDM oferecendo serviços de transporte através de caminhos de luz (lightpath). A velocidade do caminho de luz é determinada pela tecnologia dos componentes ópticos (lasers, amplificadores ópticos, etc.).

Atualmente, as velocidades na ordem de OC-48 (2.5Gbps) e OC-192 (10Gbps) são alcançáveis. Uma OTN é composta de nós WXC e um sistema de gerenciamento que controla o estabelecimento e a extinção de caminhos de luz através de funções de supervisão tais como a monitorização dos dispositivos ópticos (amplificadores, receptores), recuperação de falhas, etc. As OTNs possuem uma grande flexibilidade na sua utilização, dependendo do serviço de transporte que se deseja implementar. Uma das razões para isto é que a maior parte dos componentes ópticos são transparentes a codificação do sinal.

Somente nos limites da camada óptica, onde os sinais ópticos necessitam ser convertidos para a forma eletrônica é que a codificação gera problemas. Sendo assim, elas suportam várias tecnologias eletrônicas de rede existentes, tais como SONET, ATM, IP e frame relay rodando no topo da camada óptica.

A camada óptica é dividida em três subcamadas: a camada de rede do canal óptico, que realiza a interface com os clientes OTN fornecendo canais ópticos (Ochs); a camada de rede de multiplexação óptica, que multiplexa vários canais num único sinal óptico; e a camada de rede de seção de transmissão óptica, que fornece a transmissão do sinal óptico ao longo da fibra (SUBRAMANIAN & SOMANI, 1996).

3.15 Conclusão

Numa abordagem técnica, percebe-se neste capítulo, os princípios da constituição e funcionamento dos meios guiados compostos por vidro ou plástico, as fibras ópticas, bem como elementos aplicáveis em redes fotônicas. Há uma sensível ênfase em roteadores, uma vez que estes elementos encontram-se sempre presentes nos ambientes para os quais este estudo se dirige.

Um roteador de comprimento de onda, (λ) é uma peça chave na estrutura de rede porque busca suprimir o volume de cabos presentes na rede. Aqui foram abordados dois modelos, os não reconfiguráveis, que não possuem estágios de comutação entre os demultiplexadores e multiplexadores e os reconfiguráveis, que possuem uma matriz de roteamento com controle eletrônico, possibilitando esta ação.

No próximo capítulo apresenta-se uma visão dos dados necessários e sua estrutura para aplicação no sistema de geração da topologia virtual, bem como o significado e a maneira que ocorre a determinação das topologias em redes fotônicas.

4 DESENVOLVIMENTO

Este capítulo apresenta as necessidades de implementação de um algoritmo para otimização do tráfego dos comprimentos de onda. É abordada uma visão da coleta de dados e das topologias, exibindo o resultado das experimentações realizadas. Dessa forma, pretende-se fazer perceber o significado do uso dos componentes de rede apresentados nos capítulos anteriores, quando integrados em uma rede fotônica.

A definição dos caminhos de luz deve ser realizada de maneira a minimizar a necessidade de uso de conversores óptico-eletró-ópticos (O-E-O) nos nós intermediários do trajeto que liga a origem de um dado tráfego ao seu destino. Um aspecto importante está ligado ao fato de que a necessidade de largura de banda de cada tráfego deve ser sempre menor que a largura de banda disponível no comprimento de onda. Dessa forma, os dados apresentados como carga no arquivo da matriz de tráfego, são definidos entre 0 [zero] e 1 [um], sabendo-se que, quando o tráfego ultrapassar 1 [um], o sistema deverá verificar a possibilidade de lançamento de outro comprimento de onda. (ASSIS, WALDMANN & CALMON, 2001).

4.1 Coleta de Dados

A coleta de dados se faz necessária para a geração da matriz de tráfego, o padrão de tráfego da rede, e pode ser realizada com a utilização de qualquer software capaz de ler “sniffar” pacotes da rede. Exemplos desses softwares são: Tcpcdump, Iptraf.

O volume de dados deve contemplar todos os nós roteadores da rede que poderão estar disponíveis para alocar comprimentos de onda na topologia virtual.

O arquivo da matriz de tráfego a ser inserido no sistema deverá possuir a seguinte estrutura:

```

< número de vértices >
< origem > < destino > < tráfego >
< origem > < destino > < tráfego >
< origem > < destino > < tráfego >
(...)
< origem > < destino > < tráfego >

```

As posições que não forem especificadas no arquivo serão preenchidas com o valor zero.

As coordenadas origem/destino são zero-based, ou seja, em um arquivo que possui uma matriz com 3 vértices, as coordenadas serão de 0 a 2, como no exemplo:

Número de vértices: 3

Origem	Destino	Tráfego
0	1	0.696
0	2	0.797
1	0	0.514
1	2	0.493
2	0	0.278
2	1	0.053

Não há obrigatoriedade em especificar todos os valores origem/destino de forma bidirecional, os dados são resultantes de uma leitura de tráfego que nem sempre retorna todos os enlaces, ela reflete a situação da rede no período da leitura.

A matriz de tráfego para os estudos aqui apresentados, foram geradas a partir do programa apresentado no anexo 01, o programa solicita o número de vértices e apresenta os dados de origem/destino, eliminando os nós com origem/destino igual. Para o valor do tráfego, o programa gera um número randômico entre 0 (zero) e 1 (um).

Outra informação essencial para a geração da topologia virtual é a topologia física, que deverá ser conhecida pelo gerente da rede e fornecida ao sistema no seguinte formato:

```
< número de vértices >
< origem > < destino > < distância >
< origem > < destino > < distância >
< origem > < destino > < distância >
(...)
< origem > < destino > < distância >
```

Os vértices que não são adjacentes são preenchidos com -1.

A distância deverá conter um valor inteiro.

As coordenadas origem/destino são zero-based. Ou seja, em um arquivo que possui uma matriz com 3 vértices, as coordenadas serão de 0 a 2, como no exemplo:

Numero de Vértices: 3

Origem	Destino	Distância
0	1	300
0	2	125
1	0	136
2	1	498

O programa apresentado no anexo 01 auxilia a geração dos dados no formato especificado, porém, o usuário deve informar todas as distâncias entre os nós existentes na rede.

4.2 Topologia Virtual em Redes Fotônicas

O ajuste totalmente unidirecional dos caminhos ópticos de luz é realizado entre os nós de acesso na topologia virtual. A figura 26 apresenta um exemplo da topologia

virtual (linhas com setas) sobre a topologia física. A topologia virtual é forçada pelo recurso do nó de acesso (degrau do nó, capacidade de processamento do tráfego), no exemplo apresentado na figura 26 o degrau do nó é igual a 1, ou seja, os nós roteadores da rede possuem um transmissor e um receptor de canais (BANERJEE & MUKERJEE, 2000).

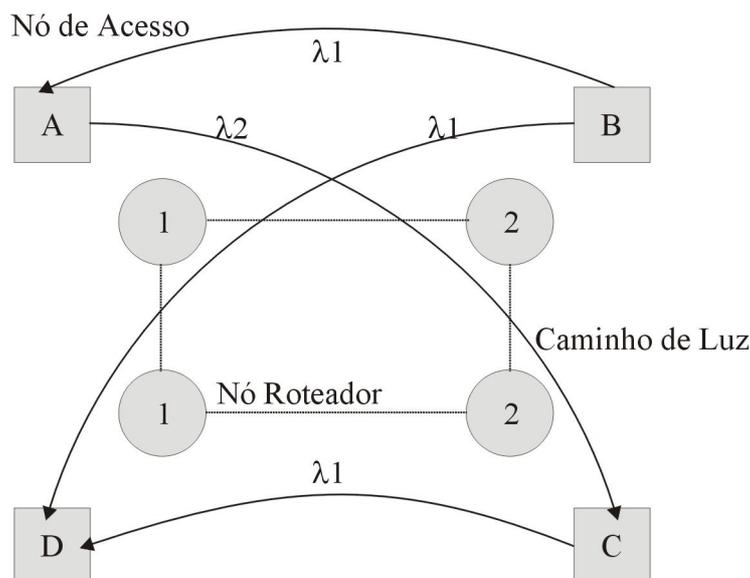


Figura 26: Topologia virtual sobre topologia física (WIRTH, 2002).

Cada um dos nós é conectado a um roteador e cada caminho de luz é rotulado com um ou mais comprimentos de onda, representados pela letra λ (lambda), (exemplo λ_1 e λ_2). É importante ressaltar que dois caminhos com o mesmo rótulo não podem compartilhar o mesmo link físico (BANERJEE & MUKERJEE, 2000).

A figura 26 exhibe que o nó de acesso A comunica-se com o nó C através de um “single-hop”, já para comunicações entre A e B, a informação deve ser processada nos nós intermediários C e D, o que representa um sistema “multi-hop”.

Ao final dos caminhos de luz, os pacotes podem ser retirados ou armazenados-e-transferidos (store-and-forward). Esta arquitetura é a conhecida como uma combinação de sistemas single-hop e multi-hop (RAMASWAMI & BANERJEE 1996).

4.3. Topologia Física X Topologia Virtual

A topologia física da rede é um grafo em que os nós são roteadores de comprimento de onda e os arcos são links de fibras ópticas (em pares, uma para cada direção), abaixo segue uma visão de uma topologia física com 6 nós.

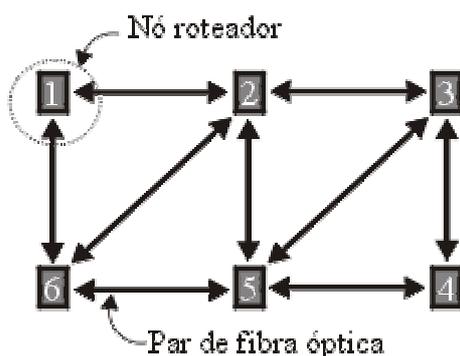


Figura 27: Grafo de uma possível topologia física para uma rede de 6 nós (WIRTH, 2002).

O conjunto de todos os caminhos ópticos unidirecionais (b_{ij}) configurados entre os nós de acesso formam a topologia virtual. A figura abaixo exibe uma possível configuração b_{ij} para uma topologia virtual.

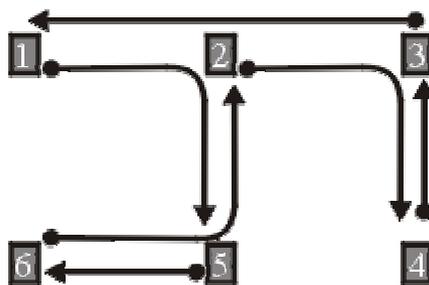


Figura 28: Uma possível topologia virtual para uma rede de 6 nós (WIRTH, 2002).

Percebe-se, na figura 28, que existe um link (arco do grafo) entre os nós 3 e 1, este link é unidirecional, serve somente para a transmissão de dados com origem no nó 3 e destino o nó 1.

Neste caso, não é necessária a conversão óptica-elétrica-óptica no nó 2, que é o nó intermediário da conexão, logo, uma conexão fim-a-fim estabelece-se entre os nós 3 e 1.

Pode-se observar também na figura 28, que além dos dados do nó 3 para o nó 1 serem enviados pelo caminho óptico b_{31} , através do nó roteador de comprimento de onda 2, é possível enviar pacotes do nó 2 para o nó 4 através do nó de roteamento 3.

A topologia física da rede apresentada exhibe uma fibra entre os nós 3 e 5; porém, para os dados com origem em 3 e destino em 5 usa-se dois links virtuais b_{31} e b_{15} .

Para uma rede com N nós, o ideal seria uma configuração de caminhos ópticos para todos os $N(N-1)$ pares. No entanto, o número de comprimentos de onda disponíveis limita-se a capacidade de processamento dos equipamentos nas pontas, e ainda, cada nó pode ser origem e destino de determinados comprimentos de onda, logo, o custo para tal operação torna a estrutura impraticável.

No próximo capítulo apresenta-se a estrutura do algoritmo utilizado no desenvolvimento do sistema, e os resultados dos testes realizados com diversas topologias físicas.

5 RESULTADOS

Segundo Ramaswami, a solução ótima para o problema pode ser resolvido com a técnica MILP, porém, para redes com mais de 10 nós, a demanda de tempo de processamento torna a operação inviável devido ao número de possibilidades/combinções necessárias para atender a solução. Assim, optou-se pelo uso e implementação do algoritmo heurístico HLDA (Heuristic Linear Design Algorithmic) por ser, segundo Ramaswami, o mais clássico. Este algoritmo tenta alocar os links virtuais entre os nós em ordem descendente de tráfego, traz resultados sub-ótimos em segundos, sendo compatível com os equipamentos disponíveis para o desenvolvimento deste estudo. Assim, os resultados a serem apresentados são emergentes desta heurística. A figura 29 apresenta o funcionamento do algoritmo HLDA.

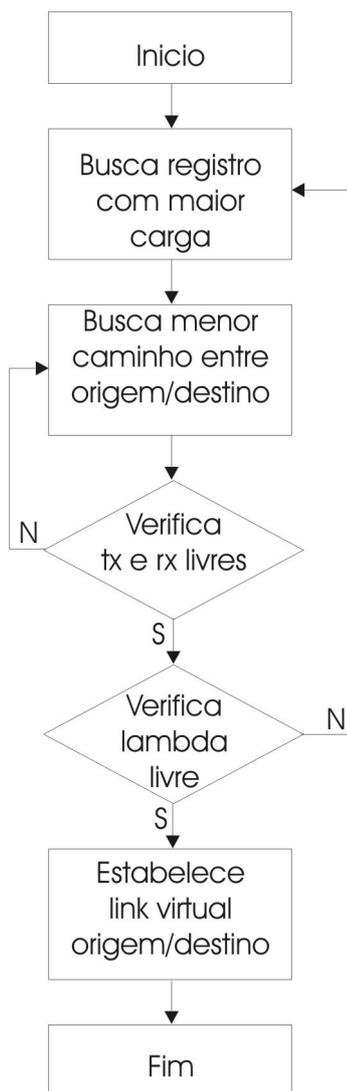


Figura 29: Algoritmo HLDA

Passos:

1º) O algoritmo varre o arquivo com as informações da matriz de tráfego em busca do registro com maior carga (que representa o fluxo do enlace), quando encontrado, armazena a informação origem/destino (o formato dos registros do arquivo da matriz de tráfego é (origem / destino / carga)).

2º) Com os dados coletados no passo anterior (origem/destino), o algoritmo procura o caminho mais próximo entre os nós, agora no arquivo que demonstra a

topologia física da rede (o formato dos registros do arquivo da topologia física é (origem / destino / distância)). Para descobrir o caminho mais curto, o algoritmo lê e calcula as distâncias de suas arestas e de seus nós adjacentes.

3º) Verifica o valor do degrau da rede, se existe transmissor livre na origem e receptor livre no destino e comprimento de onda livre para o caminho.

4º) Caso o passo anterior for positivo, aloca um caminho virtual entre origem e destino.

Para possibilitar os testes, foi implementado um programa para geração da matriz de tráfego. Os valores gerados são hipotéticos, provenientes de uma função randômica com três casas decimais. Este mesmo programa possibilita ainda, o preenchimento dos valores das distâncias, em quilômetros, das arestas da topologia física. O código fonte do programa é apresentado no anexo 01.

Ressalta-se que o esquema proposto serve para obter uma solução provinda de uma matriz estática. Logo, em situações reais, o gerente da rede deve realizar monitoramentos constantes para perceber o fluxo dos enlaces, verificando a possibilidade e necessidade de reconfiguração da rede quando necessário. Para um modelo de atendimento dinâmico, que busque reconfigurar a rede para adaptá-la em tempo real a mudanças imprevisíveis na demanda de tráfego, a solução deve levar em conta a preservação da capacidade da rede para atender as demandas futuras, imprevistas, seja em função de falhas em nós ou links, seja em função da natureza intermitente do tráfego. Porém, os dados estatísticos lidos ainda no processo de geração da matriz de tráfego sempre terão forte influência na topologia virtual resultante.

Poderá ocorrer a existência de links virtuais entre nós que não são necessariamente vizinhos na topologia física da rede. Na nova topologia, um caminho óptico conduz não somente tráfegos direcionais de um nó origem para um destino (single hop). Os nós que não estão conectados diretamente por um link virtual podem conduzir o tráfego através de multihop, usando comutação eletrônica de pacotes nos nós intermediários da topologia virtual. Esta funcionalidade pode ser provida por roteadores IP, o que forma uma rede IP sobre WDM. O roteamento nestas redes geralmente tem

sido realizado em etapas distintas; uma delas é o roteamento IP, com informações apenas da camada IP, e a outra é o roteamento de comprimento de onda com informações apenas da camada óptica.

Existe mais de uma técnica para resolver o problema da topologia virtual. Neste estudo são avaliadas as técnicas de MILP (Programação Linear Inteira Mista) e Heurística. A resolução através de MILP tem a vantagem de trazer soluções ótimas, porém o custo para esta solução pode inviabilizar o estudo. Segundo Ramaswami, quando a rede física é grande (mais de 10 nós) torna-se inviável o uso desta solução devido ao tempo e equipamento para processamento necessário. Neste caso, a solução heurística é bem vinda, pois traz uma solução sub-ótima, e o seu resultado é apresentado em segundos.

Hoje o processo de geração da matriz de tráfego já acontece com base em dados estatísticos, que podem ser lidos através de softwares de monitoração de redes. Porém, para que um gerente de redes possa ter o problema da topologia virtual resolvido, necessita exportar estes dados e fazer a utilização de outros softwares para o tratamento matemático, geralmente através de programação linear, a fim de gerar uma possível topologia virtual.

Para demonstração do estudo, a série de exemplos apresentados a seguir exibem os resultados de matrizes de tráfego geradas com uma função randômica, apresentados entre [0] e [1], bem como backbones hipotéticos de topologia física com diferentes números de nós.

A matriz de tráfego é constituída por [n] linhas com 3 colunas – exceto a primeira linha que possui a informação do número de vértices da rede – sendo que a primeira coluna apresenta o número do nó de origem do tráfego, a segunda coluna apresenta o número do nó roteador de destino e a terceira coluna apresenta o valor da carga do tráfego entre o link b_{ij} conforme a formulação $[T=t/c]$ onde [t] significa o valor lido em kbps e [c] a capacidade do link.

Percebe-se na figura 30 a representação de uma rede WAN com 13 nós. Os números nos links representam as distâncias, em quilômetros.

Cada nó corresponde a uma cidade do estado de Santa Catarina. A escolha foi assumida para representar os links físicos, onde entende-se que em cada aresta apresentada existe um par de fibras (uma em cada direção) entre os nós de acesso.

A matriz de tráfego, observada na tabela 3, está representada com dados hipotéticos onde em cada célula é representado o percentual de carga entre os nós (linha/coluna).

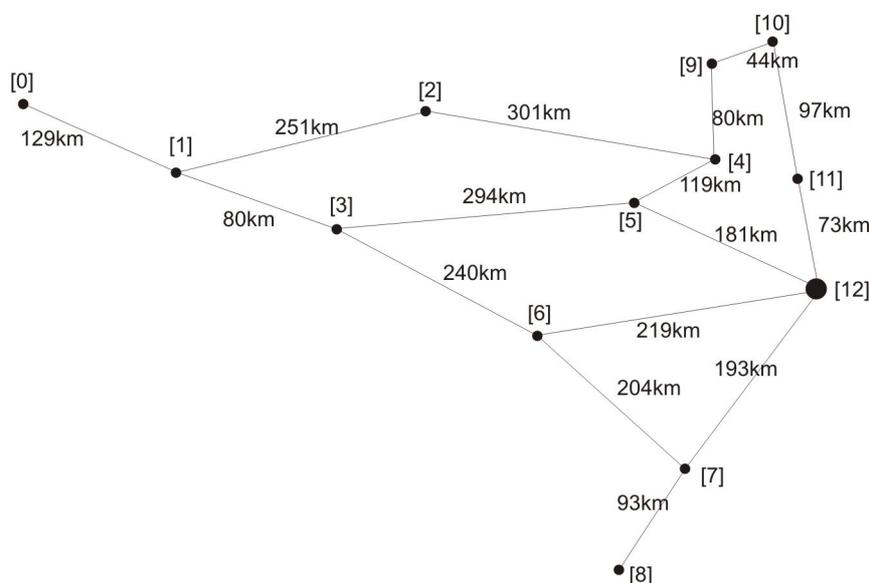


Figura 31: Topologia física da rede do estado de Santa Catarina (hipotética).

Para uma análise mais apurada, foram realizados vários testes, que são apresentados a seguir, todos com índice de grau 2, variando-se os dados da matriz de tráfego e topologia física.

5.1. Apresentação dos Testes

Teste com topologia física com seis nós

A tabela abaixo apresenta uma topologia física de 6 nós roteadores de comprimento de onda, sendo que os números da primeira coluna identificam os roteadores origem e os números da primeira linha identificam os roteadores destino. Os valores das demais células representam as distâncias, em quilômetros, entre os nós.

Tabela 4: Topologia Física com seis nós roteadores

O/D	0	1	2	3	4	5
0	-	129				
1	129	-	251	80		
2		251	-		301	
3		80		-		294
4			301		-	119
5				294	119	-

A tabela 5 exibe a topologia virtual gerada a partir dos dados da topologia física de 6 nós apresentada na tabela 4, e da matriz de tráfego apresentada no anexo 02, onde pode observar-se na primeira coluna, o link virtual origem/destino, na segunda coluna, o caminho físico por onde o sinal deve percorrer e, na terceira coluna, o número do comprimento de onda a ser utilizado.

Tabela 5: Topologia Virtual para uma rede com seis nós

Caminho Virtual	Caminho físico	Comprimento de Onda (λ)
(0-2)	0 1 2	1
(0-2)	0 1 2	2
(0-4)	0 4	1
(1-0)	1 3 5 4 0	1
(1-3)	1 3	3
(2-3)	2 1 3	1
(2-3)	2 1 3	2
(2-5)	2 4 5	1
(3-0)	3 5 4 0	2
(3-1)	3 1	1
(4-1)	4 0 1	1
(4-1)	4 0 1	3
(4-2)	4 2	1
(5-4)	5 4	3

Analisando-se os resultados deste teste, percebe-se que o sistema comporta-se positivamente, embora tenha gerado um loop entre os nós 1 e 3, o desempenho da rede não é interferido porque utilizou-se o degrau 2 para geração da topologia virtual, isso faz com que um canal fique isolado para a comunicação onde ocorreu o loop e o outro fique liberado para comunicar-se com os demais nós da rede, ainda, o sistema apresenta a utilização de 3 comprimentos de onda para satisfazer o tráfego total.

Teste com topologia física com onze nós

Tabela 6: Topologia Física com onze nós roteadores

O/D	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	-	129									
1	129	-	251	80							
2		251	-		301						
3		80		-		294	240				
4			301		-	119				80	
5				294		-					
6				240	119		-	204			
7							204	-	93		
8								93	-		
9					80					-	44
10										44	-

Tabela 7: Topologia Virtual para uma rede com onze nós

Caminho Virtual	Caminho físico	Comprimento de Onda (λ)
(1-9)	1 3 5 4 9	1
(1-6)	1 3 6	1
(4-7)	4 5 3 6 7	2
(3-8)	3 6 7 8	3
(5-8)	5 3 6 7 8	4
(2-10)	2 4 9 10	1
(2-5)	2 4 5	2
(9-10)	9 10	2
(7-1)	7 6 3 1	1
(8-6)	8 7 6	2
(7-3)	7 6 3	4
(6-2)	6 3 1 2	2
(10-0)	10 9 4 5 3 1 0	2
(10-1)	10 9 4 5 3 1	3

(5-0)	5 3 1 0	4
(6-2)	6 3 1 2	5
(4-7)	4 5 3 6 7	1
(2-5)	2 4 5	4
(5-0)	5 3 1 0	5
(6-7)	6 7	2
(9-2)	9 4 2	3
(5-0)	5 3 1 0	2
(8-6)	8 7 6	1
(8-5)	8 7 6 3 5	2
(3-8)	3 6 7 8	1
(5-8)	5 3 6 7 8	2

Neste teste observa-se a geração de dois loops, um entre os nós 1-9 e outro entre os nós 8-5. Porém, de qualquer maneira, esta limitação não implica no isolamento total dos enlaces citados, uma vez os nós possuem degrau 2. Então, um tx e um rx dos nós 1 e 9 ficam isolados para comunicação entre 1-9/9-1 e um par tx/rx estabelece conexão com os demais nós da rede. O mesmo acontece com o loop gerado para o enlace 8-5.

Teste com topologia física com dezoito nós

Tabela 8: Topologia Física para uma rede com dezoito nós

O/D	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	
0	-	129														135			
1	129	-	251	80															
2		251	-		301									238					
3		80		-		294	240								150				
4			301		-	119				80									
5				294		-							181						
6				240	119		-	204					219		200				
7							204	-	93				193						
8								93	-								75		
9					80					-	44			190					
10										44	-	97							
11											97	-	73						
12						181	219	193				73	-						
13			238							190				-					
14				150			200								-				
15	135																-		
16									75									-	90
17																	90		-

Tabela 9: Topologia Virtual para uma rede com dezoito nós

Caminho Virtual	Caminho Físico	Comprimento de Onda (λ)
(0-13)	0 1 2 13	1
(0-13)	0 1 2 13	2
(0-13)	0 1 2 13	3
(0-15)	0 15	1
(10-7)	10 11 12 7	2
(10-7)	10 11 12 7	3
(10-9)	10 9	3
(11-0)	11 12 6 3 1 0	2
(11-0)	11 12 6 3 1 0	3
(11-0)	11 12 6 3 1 0	5
(11-0)	11 12 6 3 1 0	6
(1-13)	1 2 13	1
(1-13)	1 2 13	2
(11-7)	11 12 7	1
(12-4)	12 11 10 9 4	1
(12-6)	12 6	1
(13-1)	13 2 1	1
(13-4)	13 9 4	1
(13-4)	13 9 4	2
(14-0)	14 3 1 0	1
(14-0)	14 3 1 0	2
(14-0)	14 3 1 0	3
(14-1)	14 3 1	1
(1-5)	1 3 5	1
(1-5)	1 3 5	2
(15-14)	15 0 1 3 14	1
(15-14)	15 0 1 3 14	2
(15-14)	15 0 1 3 14	3
(15-16)	15 0 1 3 6 7 8 16	2
(15-16)	15 0 1 3 6 7 8 16	3
(15-16)	15 0 1 3 6 7 8 16	4
(16-10)	16 8 7 12 11 10	2
(16-2)	16 8 7 6 3 1 2	1
(16-2)	16 8 7 6 3 1 2	2
(17-11)	17 16 8 7 12 11	1
(17-11)	17 16 8 7 12 11	3
(17-11)	17 16 8 7 12 11	5
(17-8)	17 16 8	2
(17-8)	17 16 8	4
(2-12)	2 4 9 10 11 12	1
(2-12)	2 4 9 10 11 12	2
(2-6)	2 1 3 6	1
(2-6)	2 1 3 6	2

(3-14)	3 14	2
(3-16)	3 6 7 8 16	1
(3-16)	3 6 7 8 16	2
(4-10)	4 9 10	1
(4-17)	4 9 10 11 12 7 8 16 17	1
(4-17)	4 9 10 11 12 7 8 16 17	2
(4-17)	4 9 10 11 12 7 8 16 17	3
(4-17)	4 9 10 11 12 7 8 16 17	4
(5-11)	5 12 11	1
(5-11)	5 12 11	4
(5-8)	5 12 7 8	2
(6-2)	6 3 1 2	4
(6-2)	6 3 1 2	5
(6-5)	6 12 5	1
(7-12)	7 12	4
(7-15)	7 12	2
(7-15)	7 6 3 1 0 15	3
(7-15)	7 6 3 1 0 15	4
(8-3)	8 7 6 3	2
(8-3)	8 7 6 3	4
(8-9)	8 7 12 11 10 9	2
(8-9)	8 7 12 11 10 9	3
(9-17)	9 10 11 12 7 8 16 17	2
(9-17)	9 10 11 12 7 8 16 17	3
(9-17)	9 10 11 12 7 8 16 17	4
(9-17)	9 10 11 12 7 8 16 17	5
(9-17)	9 10 11 12 7 8 16 17	6
(9-3)	9 4 5 3	1
(9-3)	9 4 5 3	3

Foram necessários 6 comprimentos de onda distintos para a topologia virtual adequar-se às necessidades de tráfego; mesmo assim, dois loops resultaram neste teste, um no enlace entre os nós 1-13 e um no enlace entre os nós 2-6. Da mesma forma que nos testes anteriores, com 11 nós roteadores, a topologia virtual gerada é positiva, ou seja, responde às necessidades de tráfego sem isolamento total de nós.

Tabela 10: Topologia Virtual para uma rede com vinte e cinco nós

O/D	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
0		653																							
1	653		179	624																					
2		179		590	555																				
3	624	624	590			490																			
4			555																						
5				490			89						491												
6						89		7					878												
7							45		418			873													
8								418		656															
9									656		478						612								
10										478		335			280										
11								873			335		396												
12						491	878					396		458											
13													458		437										
14											280			437		192									
15															192		561		755						
16										612						561		347							
17																	347		354						
18																755		354		765					675
19																			765		378				
20																				378		476			
21																					476		488		
22																						488		231	
23																							231		651
24																			675					651	

Tabela 11: Topologia Virtual para uma rede com vinte e cinco nós

Caminho Virtual	Caminho Físico	Comprimento de Onda (λ)
(23-24)	23 24	1
(24-4)	24 18 15 14 13 12 5 3 2 4	1
(9-15)	9 10 14 15	1
(10-15)	10 14 15	2
(11-0)	11 12 5 3 1 0	2
(11-0)	11 12 5 3 1 0	1
(10-23)	10 14 15 18 24 23	3
(10-23)	10 14 15 18 24 23	1
(7-1)	7 6 5 3 1	1
(7-1)	7 6 5 3 1	3
(7-1)	7 6 5 3 1	2
(3-2)	3 2	2
(13-5)	13 12 5	2
(13-5)	13 12 5	3
(15-10)	15 14 10	2
(15-10)	15 14 10	1
(7-9)	7 8 9	1
(5-23)	5 12 13 14 15 18 24 23	1
(5-23)	5 12 13 14 15 18 24 23	4
(5-23)	5 12 13 14 15 18 24 23	2
(16-13)	16 15 14 13	1
(16-13)	16 15 14 13	3
(16-13)	16 15 14 13	2
(13-17)	13 14 15 16 17	2
(13-17)	13 14 15 16 17	5
(13-17)	13 14 15 16 17	1
(23-11)	23 24 18 15 14 10 11	4
(23-11)	23 24 18 15 14 10 11	2
(23-11)	23 24 18 15 14 10 11	1
(0-8)	0 1 3 5 6 7 8	1
(0-8)	0 1 3 5 6 7 8	2
(15-11)	15 14 10 11	5
(15-11)	15 14 10 11	3
(15-11)	15 14 10 11	2
(4-8)	4 2 3 5 6 7 8	1
(4-8)	4 2 3 5 6 7 8	2
(4-8)	4 2 3 5 6 7 8	3
(24-7)	24 18 17 16 9 8 7	3
(24-7)	24 18 17 16 9 8 7	1
(21-10)	21 20 19 18 15 14 10	1
(21-10)	21 20 19 18 15 14 10	3
(21-10)	21 20 19 18 15 14 10	6
(21-10)	21 20 19 18 15 14 10	4
(1-20)	1 3 5 12 13 14 15 18 19 20	2

(1-20)	1 3 5 12 13 14 15 18 19 20	3
(1-20)	1 3 5 12 13 14 15 18 19 20	6
(1-20)	1 3 5 12 13 14 15 18 19 20	1
(9-4)	9 8 7 6 5 3 2 4	2
(9-4)	9 8 7 6 5 3 2 4	4
(9-4)	9 8 7 6 5 3 2 4	3
(18-7)	18 17 16 9 8 7	2
(18-7)	18 17 16 9 8 7	3
(21-16)	21 20 19 18 17 16	2
(21-16)	21 20 19 18 17 16	3
(18-3)	18 15 14 13 12 5 3	7
(18-3)	18 15 14 13 12 5 3	3
(18-3)	18 15 14 13 12 5 3	4
(18-3)	18 15 14 13 12 5 3	5
(17-12)	17 16 15 14 13 12	4
(17-12)	17 16 15 14 13 12	2
(17-12)	17 16 15 14 13 12	8
(19-12)	19 18 15 14 13 12	3
(19-12)	19 18 15 14 13 12	9
(19-12)	19 18 15 14 13 12	5
(22-18)	22 23 24 18	1
(22-18)	22 23 24 18	3
(22-18)	22 23 24 18	4
(5-17)	5 6 7 8 9 16 17	3
(5-17)	5 6 7 8 9 16 17	4
(5-17)	5 6 7 8 9 16 17	1
(5-17)	5 6 7 8 9 16 17	2
(14-6)	14 13 12 5 6	6
(14-6)	14 13 12 5 6	5
(14-6)	14 13 12 5 6	4
(17-22)	17 18 24 23 22	3
(17-22)	17 18 24 23 22	1
(14-0)	14 13 12 5 3 1 0	7
(14-0)	14 13 12 5 3 1 0	6
(14-0)	14 13 12 5 3 1 0	3
(14-0)	14 13 12 5 3 1 0	2
(1-19)	1 3 5 12 13 14 15 18 19	3
(1-19)	1 3 5 12 13 14 15 18 19	4
(1-19)	1 3 5 12 13 14 15 18 19	7
(1-19)	1 3 5 12 13 14 15 18 19	2
(12-14)	12 13 14	4
(12-14)	12 13 14	5
(12-3)	12 5 3	7
(4-13)	4 2 3 5 12 13	2
(4-13)	4 2 3 5 12 13	5
(4-13)	4 2 3 5 12 13	4

(20-9)	20 19 18 17 16 9	3
(20-9)	20 19 18 17 16 9	4
(20-9)	20 19 18 17 16 9	5
(11-1)	11 12 5 3 1	2
(11-1)	11 12 5 3 1	8
(11-1)	11 12 5 3 1	4
(19-16)	19 18 17 16	5
(19-16)	19 18 17 16	6
(6-2)	6 5 3 2	3
(6-2)	6 5 3 2	9
(6-2)	6 5 3 2	4
(16-18)	16 17 18	3
(16-18)	16 17 18	2
(22-21)	22 21	1
(0-21)	0 1 3 5 12 13 14 15 18 19 20 21	4
(0-21)	0 1 3 5 12 13 14 15 18 19 20 21	6
(0-21)	0 1 3 5 12 13 14 15 18 19 20 21	5
(0-21)	0 1 3 5 12 13 14 15 18 19 20 21	8
(0-21)	0 1 3 5 12 13 14 15 18 19 20 21	3
(0-21)	0 1 3 5 12 13 14 15 18 19 20 21	2
(0-21)	0 1 3 5 12 13 14 15 18 19 20 21	1
(3-20)	3 5 12 13 14 15 18 19 20	7
(3-20)	3 5 12 13 14 15 18 19 20	6
(3-20)	3 5 12 13 14 15 18 19 20	9
(3-20)	3 5 12 13 14 15 18 19 20	4
(3-20)	3 5 12 13 14 15 18 19 20	3
(20-19)	20 19	4
(6-14)	6 5 12 13 14	4
(6-14)	6 5 12 13 14	7
(6-14)	6 5 12 13 14	8
(8-22)	8 9 16 17 18 24 23 22	4
(8-22)	8 9 16 17 18 24 23 22	3
(8-22)	8 9 16 17 18 24 23 22	2
(2-5)	2 3 5	3
(2-5)	2 3 5	8
(8-24)	8 9 16 17 18 24	3
(8-24)	8 9 16 17 18 24	5
(8-24)	8 9 16 17 18 24	4
(2-6)	2 3 5 6	4
(2-6)	2 3 5 6	9
(2-6)	2 3 5 6	5

Observou-se aqui que foram utilizados 9 comprimentos de onda para a topologia virtual, foram gerados 2 loops entre os nós 10-15 e 6-14 respectivamente, admitindo-se que a topologia virtual atende totalmente às necessidades de tráfego.

Tabela 12: Topologia Física para uma rede com trinta e cinco nós

O/D	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34		
0		653																																			
1	653		179	624																																	
2		179		590	555																																
3	624	624	590			490																															
4			555																																		
5				490			89						491																								
6						89		7					878																								
7							45		418			873																									
8									418		656																										
9										656		478					612																				
10											478		335		280																						
11								873				335		396																							
12						491	878						396		458																						
13														458	437																						
14											280				437	192																					
15															192		561		755																		
16											612					561		347																			
17																	347		354																		
18																755		354		765					675												
19																			765		378																
20																				378		476															
21																					476		488														
22																							488		231												
23																								231	651					543					698		
24																			675						651	434			213								
25																									434		232										
26																										232		333			180						
27																											333		453								
28																									213			453		267							
29																								543					267		432						
30																														180		432		211			
31																																211		321			

Tabela 13: Topologia Virtual para uma rede com trinta e cinco nós

Caminho Virtual	Caminho Físico	Comprimento de Onda (λ)
(13-25)	13 14 15 18 24 25	1
(15-33)	15 18 24 23 34 33	2
(15-33)	15 18 24 23 34 33	1
(5-9)	5 6 7 8 9	1
(21-27)	21 22 23 29 28 27	1
(18-0)	18 15 14 13 12 5 3 1 0	1
(9-25)	9 16 17 18 24 25	1
(9-25)	9 16 17 18 24 25	3
(9-25)	9 16 17 18 24 25	2
(32-26)	32 31 30 26	1
(28-18)	28 24 18	1
(3-15)	3 5 12 13 14 15	1
(3-15)	3 5 12 13 14 15	2
(10-9)	10 9	1
(10-14)	10 14	1
(32-6)	32 31 30 26 25 24 18 15 14 13 12 5 6	1
(32-6)	32 31 30 26 25 24 18 15 14 13 12 5 6	2
(26-16)	26 25 24 18 17 16	2
(26-16)	26 25 24 18 17 16	3
(26-16)	26 25 24 18 17 16	1
(21-30)	21 22 23 29 30	2
(21-30)	21 22 23 29 30	1
(19-33)	19 20 21 22 23 34 33	1
(19-33)	19 20 21 22 23 34 33	3
(19-33)	19 20 21 22 23 34 33	2
(16-7)	16 9 8 7	1
(11-17)	11 10 14 15 16 17	2
(11-17)	11 10 14 15 16 17	3
(11-17)	11 10 14 15 16 17	1
(0-8)	0 1 3 5 6 7 8	1
(0-8)	0 1 3 5 6 7 8	2
(0-8)	0 1 3 5 6 7 8	3
(22-17)	22 23 24 18 17	1
(22-17)	22 23 24 18 17	4
(22-17)	22 23 24 18 17	2
(7-23)	7 8 9 16 17 18 24 23	3
(7-23)	7 8 9 16 17 18 24 23	2
(7-23)	7 8 9 16 17 18 24 23	4
(22-18)	22 23 24 18	2
(22-18)	22 23 24 18	5
(28-16)	28 24 18 17 16	6
(28-16)	28 24 18 17 16	3

(28-16)	28 24 18 17 16	2
(29-11)	29 28 24 18 15 14 10 11	2
(29-11)	29 28 24 18 15 14 10 11	3
(29-11)	29 28 24 18 15 14 10 11	7
(29-11)	29 28 24 18 15 14 10 11	1
(9-4)	9 8 7 6 5 3 2 4	2
(9-4)	9 8 7 6 5 3 2 4	1
(15-4)	15 14 13 12 5 3 2 4	4
(15-4)	15 14 13 12 5 3 2 4	3
(15-4)	15 14 13 12 5 3 2 4	2
(33-19)	33 34 23 22 21 20 19	1
(19-5)	19 18 15 14 13 12 5	1
(19-5)	19 18 15 14 13 12 5	5
(19-5)	19 18 15 14 13 12 5	4
(34-0)	34 23 24 18 15 14 13 12 5 3 1 0	2
(34-0)	34 23 24 18 15 14 13 12 5 3 1 0	3
(34-0)	34 23 24 18 15 14 13 12 5 3 1 0	8
(34-0)	34 23 24 18 15 14 13 12 5 3 1 0	6
(34-0)	34 23 24 18 15 14 13 12 5 3 1 0	5
(34-0)	34 23 24 18 15 14 13 12 5 3 1 0	4
(31-29)	31 30 29	3
(31-29)	31 30 29	1
(12-32)	12 13 14 15 18 24 25 26 30 31 32	2
(12-32)	12 13 14 15 18 24 25 26 30 31 32	4
(12-32)	12 13 14 15 18 24 25 26 30 31 32	5
(12-32)	12 13 14 15 18 24 25 26 30 31 32	3
(12-32)	12 13 14 15 18 24 25 26 30 31 32	1
(5-1)	5 3 1	5
(5-1)	5 3 1	3
(25-3)	25 24 18 15 14 13 12 5 3	3
(25-3)	25 24 18 15 14 13 12 5 3	9
(25-3)	25 24 18 15 14 13 12 5 3	7
(25-3)	25 24 18 15 14 13 12 5 3	6
(12-13)	12 13	3
(13-27)	13 14 15 18 24 28 27	5
(13-27)	13 14 15 18 24 28 27	4
(13-27)	13 14 15 18 24 28 27	6
(13-27)	13 14 15 18 24 28 27	1
(13-27)	13 14 15 18 24 28 27	2
(2-34)	2 3 5 12 13 14 15 18 24 23 34	1
(2-34)	2 3 5 12 13 14 15 18 24 23 34	3
(2-34)	2 3 5 12 13 14 15 18 24 23 34	2
(2-34)	2 3 5 12 13 14 15 18 24 23 34	4
(2-34)	2 3 5 12 13 14 15 18 24 23 34	6
(2-34)	2 3 5 12 13 14 15 18 24 23 34	5
(2-34)	2 3 5 12 13 14 15 18 24 23 34	7

(8-30)	8 9 16 17 18 24 25 26 30	4
(8-30)	8 9 16 17 18 24 25 26 30	3
(8-30)	8 9 16 17 18 24 25 26 30	8
(8-30)	8 9 16 17 18 24 25 26 30	2
(26-8)	26 25 24 18 17 16 9 8	10
(26-8)	26 25 24 18 17 16 9 8	4
(26-8)	26 25 24 18 17 16 9 8	2
(26-8)	26 25 24 18 17 16 9 8	3
(8-20)	8 9 16 17 18 19 20	5
(8-20)	8 9 16 17 18 19 20	4
(8-20)	8 9 16 17 18 19 20	1
(8-20)	8 9 16 17 18 19 20	2
(27-10)	27 28 24 18 15 14 10	1
(27-10)	27 28 24 18 15 14 10	4
(27-10)	27 28 24 18 15 14 10	11
(27-10)	27 28 24 18 15 14 10	7
(27-10)	27 28 24 18 15 14 10	8
(27-10)	27 28 24 18 15 14 10	2
(20-3)	20 19 18 15 14 13 12 5 3	2
(20-3)	20 19 18 15 14 13 12 5 3	8
(20-3)	20 19 18 15 14 13 12 5 3	9
(20-3)	20 19 18 15 14 13 12 5 3	7
(3-7)	3 5 6 7	4
(3-7)	3 5 6 7	3
(17-34)	17 18 24 23 34	5
(17-34)	17 18 24 23 34	9
(17-34)	17 18 24 23 34	4
(30-14)	30 26 25 24 18 15 14	3
(30-14)	30 26 25 24 18 15 14	4
(30-14)	30 26 25 24 18 15 14	5
(30-14)	30 26 25 24 18 15 14	12
(30-14)	30 26 25 24 18 15 14	9
(30-14)	30 26 25 24 18 15 14	10
(33-23)	33 34 23	2
(33-23)	33 34 23	3
(17-32)	17 18 24 25 26 30 31 32	6
(17-32)	17 18 24 25 26 30 31 32	10
(17-32)	17 18 24 25 26 30 31 32	5
(17-32)	17 18 24 25 26 30 31 32	3
(17-32)	17 18 24 25 26 30 31 32	2
(14-13)	14 13	8
(7-28)	7 8 9 16 17 18 24 28	4
(7-28)	7 8 9 16 17 18 24 28	5
(7-28)	7 8 9 16 17 18 24 28	6
(7-28)	7 8 9 16 17 18 24 28	7
(7-28)	7 8 9 16 17 18 24 28	11

(7-28)	7 8 9 16 17 18 24 28	2
(29-2)	29 28 24 18 15 14 13 12 5 3 2	5
(29-2)	29 28 24 18 15 14 13 12 5 3 2	13
(29-2)	29 28 24 18 15 14 13 12 5 3 2	10
(29-2)	29 28 24 18 15 14 13 12 5 3 2	11
(29-2)	29 28 24 18 15 14 13 12 5 3 2	9
(29-2)	29 28 24 18 15 14 13 12 5 3 2	8
(29-2)	29 28 24 18 15 14 13 12 5 3 2	3
(4-11)	4 2 3 5 12 11	2
(4-11)	4 2 3 5 12 11	5
(4-11)	4 2 3 5 12 11	3
(4-11)	4 2 3 5 12 11	1
(23-21)	23 22 21	2
(23-31)	23 29 30 31	2
(23-31)	23 29 30 31	3
(11-28)	11 10 14 15 18 24 28	2
(11-28)	11 10 14 15 18 24 28	7
(11-28)	11 10 14 15 18 24 28	6
(11-28)	11 10 14 15 18 24 28	12
(11-28)	11 10 14 15 18 24 28	3
(16-5)	16 9 8 7 6 5	4
(16-5)	16 9 8 7 6 5	3
(16-5)	16 9 8 7 6 5	2
(24-22)	24 23 22	5
(24-22)	24 23 22	3
(0-21)	0 1 3 5 12 13 14 15 18 19 20 21	6
(0-21)	0 1 3 5 12 13 14 15 18 19 20 21	4
(0-21)	0 1 3 5 12 13 14 15 18 19 20 21	5
(0-21)	0 1 3 5 12 13 14 15 18 19 20 21	8
(0-21)	0 1 3 5 12 13 14 15 18 19 20 21	7
(0-21)	0 1 3 5 12 13 14 15 18 19 20 21	2
(0-21)	0 1 3 5 12 13 14 15 18 19 20 21	3
(2-24)	2 3 5 12 13 14 15 18 24	3
(2-24)	2 3 5 12 13 14 15 18 24	7
(2-24)	2 3 5 12 13 14 15 18 24	5
(2-24)	2 3 5 12 13 14 15 18 24	6
(2-24)	2 3 5 12 13 14 15 18 24	9
(2-24)	2 3 5 12 13 14 15 18 24	8
(2-24)	2 3 5 12 13 14 15 18 24	13
(31-15)	31 30 26 25 24 18 15	4
(31-15)	31 30 26 25 24 18 15	5
(31-15)	31 30 26 25 24 18 15	6
(31-15)	31 30 26 25 24 18 15	14
(31-15)	31 30 26 25 24 18 15	11
(14-24)	14 15 18 24	10
(14-24)	14 15 18 24	9

(14-24)	14 15 18 24	14
(20-31)	20 21 22 23 29 30 31	3
(20-31)	20 21 22 23 29 30 31	6
(20-31)	20 21 22 23 29 30 31	4
(4-22)	4 2 3 5 12 13 14 15 18 24 23 22	2
(4-22)	4 2 3 5 12 13 14 15 18 24 23 22	4
(4-22)	4 2 3 5 12 13 14 15 18 24 23 22	8
(4-22)	4 2 3 5 12 13 14 15 18 24 23 22	6
(4-22)	4 2 3 5 12 13 14 15 18 24 23 22	7
(4-22)	4 2 3 5 12 13 14 15 18 24 23 22	11
(4-22)	4 2 3 5 12 13 14 15 18 24 23 22	10
(4-22)	4 2 3 5 12 13 14 15 18 24 23 22	15
(34-29)	34 23 29	4
(34-29)	34 23 29	5
(25-12)	25 24 18 15 14 13 12	7
(25-12)	25 24 18 15 14 13 12	15
(25-12)	25 24 18 15 14 13 12	12
(25-12)	25 24 18 15 14 13 12	10
(25-12)	25 24 18 15 14 13 12	9
(6-10)	6 7 11 10	4
(6-10)	6 7 11 10	1
(6-10)	6 7 11 10	3
(1-19)	1 3 5 12 13 14 15 18 19	9
(1-19)	1 3 5 12 13 14 15 18 19	7
(1-19)	1 3 5 12 13 14 15 18 19	8
(1-19)	1 3 5 12 13 14 15 18 19	12
(1-19)	1 3 5 12 13 14 15 18 19	11
(1-19)	1 3 5 12 13 14 15 18 19	3
(27-2)	27 28 24 18 15 14 13 12 5 3 2	2
(27-2)	27 28 24 18 15 14 13 12 5 3 2	6
(27-2)	27 28 24 18 15 14 13 12 5 3 2	16
(27-2)	27 28 24 18 15 14 13 12 5 3 2	13
(27-2)	27 28 24 18 15 14 13 12 5 3 2	11
(27-2)	27 28 24 18 15 14 13 12 5 3 2	10
(27-2)	27 28 24 18 15 14 13 12 5 3 2	9
(27-2)	27 28 24 18 15 14 13 12 5 3 2	4
(18-26)	18 24 25 26	16
(18-26)	18 24 25 26	6
(18-26)	18 24 25 26	4
(6-12)	6 5 12	3
(6-12)	6 5 12	8
(24-1)	24 18 15 14 13 12 5 3 1	17
(24-1)	24 18 15 14 13 12 5 3 1	14
(24-1)	24 18 15 14 13 12 5 3 1	12
(24-1)	24 18 15 14 13 12 5 3 1	11
(24-1)	24 18 15 14 13 12 5 3 1	10

(24-1)	24 18 15 14 13 12 5 3 1	4
(30-6)	30 26 25 24 18 15 14 13 12 5 6	5
(30-6)	30 26 25 24 18 15 14 13 12 5 6	6
(30-6)	30 26 25 24 18 15 14 13 12 5 6	8
(30-6)	30 26 25 24 18 15 14 13 12 5 6	18
(30-6)	30 26 25 24 18 15 14 13 12 5 6	15
(30-6)	30 26 25 24 18 15 14 13 12 5 6	13
(30-6)	30 26 25 24 18 15 14 13 12 5 6	12
(30-6)	30 26 25 24 18 15 14 13 12 5 6	11
(1-20)	1 3 5 12 13 14 15 18 19 20	10
(1-20)	1 3 5 12 13 14 15 18 19 20	9
(1-20)	1 3 5 12 13 14 15 18 19 20	13
(1-20)	1 3 5 12 13 14 15 18 19 20	12
(1-20)	1 3 5 12 13 14 15 18 19 20	4

Para a geração da topologia virtual em uma rede com 35 nós, o sistema necessitou de 18 comprimentos de onda. De acordo com a matriz de tráfego utilizada, somente um loop foi gerado entre os nós 19-33, percebendo-se, cada vez mais, que o sistema atende aos objetivos propostos.

Tabela 15: Topologia Virtual para uma rede com quarenta e cinco nós

Caminho Virtual	Caminho Físico	Comprimento de Onda (λ)
(8-7)	8 7	1
(5-39)	5 12 13 37 38 39	1
(42-8)	42 41 40 39 38 37 13 12 5 6 7 8	1
(42-17)	42 41 40 39 38 37 13 14 15 16 17	2
(42-17)	42 41 40 39 38 37 13 14 15 16 17	1
(13-31)	13 37 36 30 31	2
(13-31)	13 37 36 30 31	1
(39-18)	39 38 37 13 14 15 18	3
(39-18)	39 38 37 13 14 15 18	2
(39-18)	39 38 37 13 14 15 18	1
(15-27)	15 18 24 28 27	2
(15-27)	15 18 24 28 27	1
(27-42)	27 26 30 36 35 44 43 42	1
(44-9)	44 35 36 37 13 14 10 9	4
(44-9)	44 35 36 37 13 14 10 9	3
(44-9)	44 35 36 37 13 14 10 9	1
(14-25)	14 15 18 24 25	3
(14-25)	14 15 18 24 25	2
(14-25)	14 15 18 24 25	1
(8-39)	8 7 6 5 12 13 37 38 39	1
(8-39)	8 7 6 5 12 13 37 38 39	3
(8-39)	8 7 6 5 12 13 37 38 39	2
(22-37)	22 23 29 30 36 37	1
(22-37)	22 23 29 30 36 37	2
(24-3)	24 18 15 14 13 12 5 3	2
(24-3)	24 18 15 14 13 12 5 3	1
(21-34)	21 22 23 34	2
(21-34)	21 22 23 34	1
(23-11)	23 24 18 15 14 10 11	2
(23-11)	23 24 18 15 14 10 11	1
(13-7)	13 12 5 6 7	3
(13-7)	13 12 5 6 7	2
(5-41)	5 12 13 37 38 39 40 41	4
(5-41)	5 12 13 37 38 39 40 41	3
(5-41)	5 12 13 37 38 39 40 41	1
(17-43)	17 18 24 25 26 30 36 35 44 43	2
(17-43)	17 18 24 25 26 30 36 35 44 43	1
(17-43)	17 18 24 25 26 30 36 35 44 43	3
(40-16)	40 39 38 37 13 14 15 16	3
(40-16)	40 39 38 37 13 14 15 16	5
(40-16)	40 39 38 37 13 14 15 16	4
(40-16)	40 39 38 37 13 14 15 16	2
(22-30)	22 23 29 30	3
(22-30)	22 23 29 30	2

(39-8)	39 38 37 13 12 5 6 7 8	5
(39-8)	39 38 37 13 12 5 6 7 8	6
(39-8)	39 38 37 13 12 5 6 7 8	4
(39-8)	39 38 37 13 12 5 6 7 8	3
(39-8)	39 38 37 13 12 5 6 7 8	2
(37-2)	37 13 12 5 3 2	7
(37-2)	37 13 12 5 3 2	5
(37-2)	37 13 12 5 3 2	2
(37-2)	37 13 12 5 3 2	1
(21-25)	21 22 23 24 25	4
(21-25)	21 22 23 24 25	2
(21-25)	21 22 23 24 25	3
(40-37)	40 39 38 37	4
(40-37)	40 39 38 37	6
(37-3)	37 13 12 5 3	8
(37-3)	37 13 12 5 3	6
(37-3)	37 13 12 5 3	3
(28-35)	28 29 30 36 35	1
(28-35)	28 29 30 36 35	3
(28-35)	28 29 30 36 35	4
(35-33)	35 36 30 31 32 33	2
(35-33)	35 36 30 31 32 33	1
(28-36)	28 29 30 36	2
(28-36)	28 29 30 36	4
(28-36)	28 29 30 36	5
(10-29)	10 14 15 18 24 28 29	1
(10-29)	10 14 15 18 24 28 29	5
(10-29)	10 14 15 18 24 28 29	4
(10-29)	10 14 15 18 24 28 29	2
(10-29)	10 14 15 18 24 28 29	3
(12-19)	12 13 14 15 18 19	4
(12-19)	12 13 14 15 18 19	6
(12-19)	12 13 14 15 18 19	5
(12-19)	12 13 14 15 18 19	1
(2-14)	2 3 5 12 13 14	1
(2-14)	2 3 5 12 13 14	4
(2-14)	2 3 5 12 13 14	5
(2-14)	2 3 5 12 13 14	6
(27-18)	27 28 24 18	1
(27-18)	27 28 24 18	3
(7-35)	7 6 5 12 13 37 36 35	2
(7-35)	7 6 5 12 13 37 36 35	6
(7-35)	7 6 5 12 13 37 36 35	5
(7-35)	7 6 5 12 13 37 36 35	4
(41-44)	41 42 43 44	1
(35-44)	35 44	3

(32-0)	32 31 30 36 37 13 12 5 3 1 0	6
(32-0)	32 31 30 36 37 13 12 5 3 1 0	3
(32-0)	32 31 30 36 37 13 12 5 3 1 0	9
(32-0)	32 31 30 36 37 13 12 5 3 1 0	7
(32-0)	32 31 30 36 37 13 12 5 3 1 0	4
(32-0)	32 31 30 36 37 13 12 5 3 1 0	1
(15-28)	15 18 24 28	6
(15-28)	15 18 24 28	5
(15-28)	15 18 24 28	3
(9-34)	9 16 17 18 24 23 34	2
(9-34)	9 16 17 18 24 23 34	6
(9-34)	9 16 17 18 24 23 34	1
(7-29)	7 6 5 12 13 37 36 30 29	3
(7-29)	7 6 5 12 13 37 36 30 29	7
(7-29)	7 6 5 12 13 37 36 30 29	6
(7-29)	7 6 5 12 13 37 36 30 29	1
(0-43)	0 1 3 5 12 13 37 38 39 40 41 42 43	1
(0-43)	0 1 3 5 12 13 37 38 39 40 41 42 43	8
(0-43)	0 1 3 5 12 13 37 38 39 40 41 42 43	7
(0-43)	0 1 3 5 12 13 37 38 39 40 41 42 43	4
(0-43)	0 1 3 5 12 13 37 38 39 40 41 42 43	2
(20-12)	20 19 18 15 14 13 12	1
(20-12)	20 19 18 15 14 13 12	3
(20-12)	20 19 18 15 14 13 12	2
(20-12)	20 19 18 15 14 13 12	8
(25-0)	25 26 30 36 37 13 12 5 3 1 0	3
(25-0)	25 26 30 36 37 13 12 5 3 1 0	7
(25-0)	25 26 30 36 37 13 12 5 3 1 0	4
(25-0)	25 26 30 36 37 13 12 5 3 1 0	10
(25-0)	25 26 30 36 37 13 12 5 3 1 0	9
(25-0)	25 26 30 36 37 13 12 5 3 1 0	8
(25-0)	25 26 30 36 37 13 12 5 3 1 0	5
(25-0)	25 26 30 36 37 13 12 5 3 1 0	2
(6-28)	6 5 12 13 14 15 18 24 28	4
(6-28)	6 5 12 13 14 15 18 24 28	8
(6-28)	6 5 12 13 14 15 18 24 28	9
(6-28)	6 5 12 13 14 15 18 24 28	7
(41-12)	41 40 39 38 37 13 12	3
(41-12)	41 40 39 38 37 13 12	5
(41-12)	41 40 39 38 37 13 12	7
(41-12)	41 40 39 38 37 13 12	11
(41-12)	41 40 39 38 37 13 12	10
(33-4)	33 32 31 30 36 37 13 12 5 3 2 4	2

(33-4)	33 32 31 30 36 37 13 12 5 3 2 4	8
(33-4)	33 32 31 30 36 37 13 12 5 3 2 4	5
(33-4)	33 32 31 30 36 37 13 12 5 3 2 4	12
(33-4)	33 32 31 30 36 37 13 12 5 3 2 4	11
(33-4)	33 32 31 30 36 37 13 12 5 3 2 4	9
(33-4)	33 32 31 30 36 37 13 12 5 3 2 4	6
(33-4)	33 32 31 30 36 37 13 12 5 3 2 4	1
(38-10)	38 37 13 14 10	13
(38-10)	38 37 13 14 10	8
(38-10)	38 37 13 14 10	3
(34-30)	34 33 32 31 30	1
(34-30)	34 33 32 31 30	2
(34-30)	34 33 32 31 30	3
(25-19)	25 24 18 19	1
(25-19)	25 24 18 19	4
(25-19)	25 24 18 19	2
(36-32)	36 30 31 32	4
(36-32)	36 30 31 32	3
(36-32)	36 30 31 32	2
(16-23)	16 17 18 24 23	3
(16-23)	16 17 18 24 23	8
(16-23)	16 17 18 24 23	2
(36-15)	36 37 13 14 15	6
(36-15)	36 37 13 14 15	14
(36-15)	36 37 13 14 15	9
(36-15)	36 37 13 14 15	8
(26-1)	26 30 36 37 13 12 5 3 1	4
(26-1)	26 30 36 37 13 12 5 3 1	9
(26-1)	26 30 36 37 13 12 5 3 1	15
(26-1)	26 30 36 37 13 12 5 3 1	12
(26-1)	26 30 36 37 13 12 5 3 1	10
(26-1)	26 30 36 37 13 12 5 3 1	7
(26-1)	26 30 36 37 13 12 5 3 1	3
(11-5)	11 12 5	1
(11-5)	11 12 5	11
(6-1)	6 5 3 1	5
(6-1)	6 5 3 1	8
(6-1)	6 5 3 1	4
(43-13)	43 42 41 40 39 38 37 13	2
(43-13)	43 42 41 40 39 38 37 13	3
(43-13)	43 42 41 40 39 38 37 13	4
(43-13)	43 42 41 40 39 38 37 13	6
(43-13)	43 42 41 40 39 38 37 13	8
(43-13)	43 42 41 40 39 38 37 13	9
(43-13)	43 42 41 40 39 38 37 13	16
(31-23)	31 30 29 23	4

(31-23)	31 30 29 23	2
(31-23)	31 30 29 23	1
(17-40)	17 16 15 14 13 37 38 39 40	1
(17-40)	17 16 15 14 13 37 38 39 40	4
(17-40)	17 16 15 14 13 37 38 39 40	8
(17-40)	17 16 15 14 13 37 38 39 40	5
(17-40)	17 16 15 14 13 37 38 39 40	3
(10-33)	10 14 13 37 36 30 31 32 33	2
(10-33)	10 14 13 37 36 30 31 32 33	4
(10-33)	10 14 13 37 36 30 31 32 33	9
(10-33)	10 14 13 37 36 30 31 32 33	5
(10-33)	10 14 13 37 36 30 31 32 33	3
(30-24)	30 26 25 24	1
(30-24)	30 26 25 24	2
(29-20)	29 23 22 21 20	2
(29-20)	29 23 22 21 20	1
(29-6)	29 30 36 37 13 12 5 6	5
(29-6)	29 30 36 37 13 12 5 6	10
(29-6)	29 30 36 37 13 12 5 6	8
(29-6)	29 30 36 37 13 12 5 6	17
(29-6)	29 30 36 37 13 12 5 6	13
(29-6)	29 30 36 37 13 12 5 6	12
(29-6)	29 30 36 37 13 12 5 6	4
(3-15)	3 5 12 13 14 15	3
(3-15)	3 5 12 13 14 15	10
(3-15)	3 5 12 13 14 15	9
(18-11)	18 15 14 10 11	4
(18-11)	18 15 14 10 11	5
(18-11)	18 15 14 10 11	2
(9-5)	9 8 7 6 5	1
(9-5)	9 8 7 6 5	3
(9-5)	9 8 7 6 5	4
(9-5)	9 8 7 6 5	6
(38-32)	38 37 36 30 31 32	10
(38-32)	38 37 36 30 31 32	6
(38-32)	38 37 36 30 31 32	5
(38-32)	38 37 36 30 31 32	4
(12-22)	12 13 37 36 30 29 23 22	11
(12-22)	12 13 37 36 30 29 23 22	10
(12-22)	12 13 37 36 30 29 23 22	6
(12-22)	12 13 37 36 30 29 23 22	7
(12-22)	12 13 37 36 30 29 23 22	3
(12-22)	12 13 37 36 30 29 23 22	2
(19-2)	19 18 15 14 13 12 5 3 2	2
(19-2)	19 18 15 14 13 12 5 3 2	6
(19-2)	19 18 15 14 13 12 5 3 2	5

(19-2)	19 18 15 14 13 12 5 3 2	14
(19-2)	19 18 15 14 13 12 5 3 2	13
(19-2)	19 18 15 14 13 12 5 3 2	9
(19-2)	19 18 15 14 13 12 5 3 2	3
(0-21)	0 1 3 5 12 13 14 15 18 19 20 21	2
(0-21)	0 1 3 5 12 13 14 15 18 19 20 21	4
(0-21)	0 1 3 5 12 13 14 15 18 19 20 21	12
(0-21)	0 1 3 5 12 13 14 15 18 19 20 21	11
(0-21)	0 1 3 5 12 13 14 15 18 19 20 21	10
(0-21)	0 1 3 5 12 13 14 15 18 19 20 21	8
(0-21)	0 1 3 5 12 13 14 15 18 19 20 21	3
(0-21)	0 1 3 5 12 13 14 15 18 19 20 21	1
(2-4)	2 4	2
(24-13)	24 18 15 14 13	5
(24-13)	24 18 15 14 13	7
(24-13)	24 18 15 14 13	6
(30-36)	30 36	11
(11-16)	11 10 14 15 16	1
(11-16)	11 10 14 15 16	3
(11-16)	11 10 14 15 16	11
(32-31)	32 31	4
(34-21)	34 23 22 21	1
(34-21)	34 23 22 21	3
(34-21)	34 23 22 21	2
(16-6)	16 9 8 7 6	1
(16-6)	16 9 8 7 6	2
(16-6)	16 9 8 7 6	4
(16-6)	16 9 8 7 6	5
(3-26)	3 5 12 13 37 36 30 26	5
(3-26)	3 5 12 13 37 36 30 26	13
(3-26)	3 5 12 13 37 36 30 26	11
(3-26)	3 5 12 13 37 36 30 26	7
(3-26)	3 5 12 13 37 36 30 26	8
(3-26)	3 5 12 13 37 36 30 26	2
(33-38)	33 32 31 30 36 37 38	3
(33-38)	33 32 31 30 36 37 38	5
(33-38)	33 32 31 30 36 37 38	12
(33-38)	33 32 31 30 36 37 38	9
(33-38)	33 32 31 30 36 37 38	6
(26-42)	26 30 36 35 44 43 42	13
(26-42)	26 30 36 35 44 43 42	5
(26-42)	26 30 36 35 44 43 42	4
(26-42)	26 30 36 35 44 43 42	3
(19-27)	19 18 24 28 27	3
(19-27)	19 18 24 28 27	9
(19-27)	19 18 24 28 27	5

(19-27)	19 18 24 28 27	2
(4-38)	4 2 3 5 12 13 37 38	1
(4-38)	4 2 3 5 12 13 37 38	2
(4-38)	4 2 3 5 12 13 37 38	6
(4-38)	4 2 3 5 12 13 37 38	14
(4-38)	4 2 3 5 12 13 37 38	12
(4-38)	4 2 3 5 12 13 37 38	7
(1-9)	1 3 5 6 7 8 9	3
(1-9)	1 3 5 6 7 8 9	7
(1-9)	1 3 5 6 7 8 9	5
(1-9)	1 3 5 6 7 8 9	4
(1-9)	1 3 5 6 7 8 9	1
(44-24)	44 35 36 30 26 25 24	9
(44-24)	44 35 36 30 26 25 24	3
(44-24)	44 35 36 30 26 25 24	2
(20-41)	20 21 22 23 29 30 36 37 38 39 40 41	2
(20-41)	20 21 22 23 29 30 36 37 38 39 40 41	5
(20-41)	20 21 22 23 29 30 36 37 38 39 40 41	6
(20-41)	20 21 22 23 29 30 36 37 38 39 40 41	14
(20-41)	20 21 22 23 29 30 36 37 38 39 40 41	10
(20-41)	20 21 22 23 29 30 36 37 38 39 40 41	8
(20-41)	20 21 22 23 29 30 36 37 38 39 40 41	4
(20-41)	20 21 22 23 29 30 36 37 38 39 40 41	3
(14-22)	14 15 18 24 23 22	12
(14-22)	14 15 18 24 23 22	9
(14-22)	14 15 18 24 23 22	10
(14-22)	14 15 18 24 23 22	3
(14-22)	14 15 18 24 23 22	4
(4-40)	4 2 3 5 12 13 37 38 39 40	2
(4-40)	4 2 3 5 12 13 37 38 39 40	3
(4-40)	4 2 3 5 12 13 37 38 39 40	8
(4-40)	4 2 3 5 12 13 37 38 39 40	15
(4-40)	4 2 3 5 12 13 37 38 39 40	13
(4-40)	4 2 3 5 12 13 37 38 39 40	9
(4-40)	4 2 3 5 12 13 37 38 39 40	7
(4-40)	4 2 3 5 12 13 37 38 39 40	5
(43-20)	43 44 35 36 30 29 23 22 21 20	10
(43-20)	43 44 35 36 30 29 23 22 21 20	4
(43-20)	43 44 35 36 30 29 23 22 21 20	5
(43-20)	43 44 35 36 30 29 23 22 21 20	3
(43-20)	43 44 35 36 30 29 23 22 21 20	2

(18-26)	18 24 25 26	11
(18-26)	18 24 25 26	4
(18-26)	18 24 25 26	3
(31-17)	31 30 26 25 24 18 17	6
(31-17)	31 30 26 25 24 18 17	4
(31-17)	31 30 26 25 24 18 17	3
(31-17)	31 30 26 25 24 18 17	1
(23-14)	23 24 18 15 14	3
(23-14)	23 24 18 15 14	7
(23-14)	23 24 18 15 14	8
(1-10)	1 3 5 12 11 10	4
(1-10)	1 3 5 12 11 10	9
(1-10)	1 3 5 12 11 10	14
(1-10)	1 3 5 12 11 10	1
(1-10)	1 3 5 12 11 10	2

A topologia virtual para uma rede com 45 nós foi gerada utilizando-se de 16 comprimentos de onda. O resultado apresentou deficiência em 2 enlaces onde gerou 5 loops, impedindo o fluxo dos nós envolvidos com os demais pontos da rede. O enlace 8-39/39-8 apresentou 3 loops, o que ultrapassa inclusive o degrau 2 estabelecido para a rede, o enlace 21-34 apresentou 2 loops, o que é suficiente para isolar os nós da rede, ou seja, a comunicação ficaria estabelecida entre os nós 21-34 e 34-21, não se comunicando com os demais nós da rede.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho apresentou um estudo sobre redes fotônicas, onde uma atenção especial foi dada ao problema da geração da topologia virtual utilizando-se dados de uma matriz de tráfego e topologia física conhecidas. O sistema desenvolvido foi a implementação do algoritmo HLDA proposto por Ramaswami (RAMASWAMI & BANERJEE, 1996).

Foram realizados 6 testes, considerando-se situações de redes com 6, 11, 18, 25, 35 e 45 nós, respectivamente.

Os resultados dos testes demonstram que a utilização do algoritmo HLDA traz resultados efetivos e úteis quando os dados submetidos ao software de geração da topologia virtual informam o grau da rede igual a 2, aliado a uma rede com poucos nós. Percebeu-se que, quando existe um alto tráfego entre dois nós (ex. [0] e [1]) em ambas as direções, o sistema cria um link virtual de [0] para [1] e outro de [1] para [0]; conseqüentemente um loop para um degrau, isolando a comunicação entre estes nós e os demais. Isto indica que, para redes com graus pequenos e grandes números de nós, outro algoritmo deve ser utilizado. O teste apresentado com 45 nós indica perfeitamente esta necessidade, quando demonstra a geração de um loop triplo em um único enlace.

Todos os testes foram realizados utilizando-se o índice degrau 2 para a topologia virtual a fim de perceber a limitação do sistema implementado com o algoritmo HLDA, e percebe-se nitidamente que é totalmente funcional para redes pequenas, com baixo índice degrau.

Mediante os objetivos apresentados, observa-se que a topologia virtual diminui consideravelmente o processamento eletrônico. Isso pode ser observado na coluna que apresenta o caminho físico nas tabelas das topologias virtuais, onde, sem o link virtual, o pacote teria que ser processado eletronicamente em cada um dos nós intermediários.

A desvantagem fica por conta da necessidade de um aumento no número de degraus quando a rede possui um número de nós elevado, o que pode inviabilizar a implantação da tecnologia devido aos custos dos lasers necessários em cada nó roteador de comprimentos de onda. Neste sentido, para redes grandes, o sistema demanda um

algoritmo capaz de priorizar o tráfego para um determinado link, quando ocorre a geração de um loop. Além disso, este algoritmo deve poder tratar o número de degraus, isoladamente, em cada nó roteador de comprimentos de onda.

O sistema desenvolvido torna-se uma alternativa para agilizar o processo de reconfiguração de roteadores de comprimentos de onda em redes fotônicas, visando o ganho de desempenho da rede mediante diminuição do processamento eletrônico em nós intermediários de um caminho óptico.

Assim, o sistema para geração da topologia virtual em redes fotônicas adere-se às necessidades estabelecidas nos objetivos deste trabalho, embora ainda seja necessária a determinação da topologia física e da matriz de tráfego pelo administrador da rede. O código fonte do sistema pode ser visualizado no anexo 03.

Propõe-se para trabalhos futuros, a implementação de um sistema capaz de monitorar o tráfego de uma rede e montar a topologia virtual em tempo real, eliminando, desta forma, a necessidade de intervenção humana para a reconfiguração da topologia virtual da rede.

7 REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, Raul Camelo. **Alocação de Rota e Comprimento de Ondas em Anéis WDM**. Dissertação de mestrado, 2002.
- DA CUNHA. Claudio Barbieri. BONASSER, Ulisses de Oliveira. ABRAHÃO, Fernando Teixeira Mendes. **Experimentos Computacionais com Heurísticas de Melhorias para o Problema do Caixeiro Viajante**. Departamento de Engenharia de Transportes, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 2003
- ASSIS, K.D.R., WALDMANN, H and CALMON, L.C. (2001). **Virtual Topology Design for a Hypothetical Optical Network**. **Proceedings of WDM and Photonic Switching Device for Network Applications II, part of Photonics West**, 20-26 january, San Jose, Ca.
- B. Mukherjee, **“Optical Communication Networks”** McGraw-Hill, 1997.
- BANERJEE, D. and Mukerjee, B. (2000) **A Review of Routing and WavelengthRouted Optical WDM Networks**. *Optical Networks*, vol. 1. pp. 47-60.
- CAMPELO, R. WALDMANN, H. **“Estratégias de Ampliação da Capacidade de Anéis Ópticos com Bloqueio”**, XVIII Simpósio Brasileiro de Telecomunicações – SBrT, setembro 2000. D. Cavendish, **“Evolution of Optical Transport Technologies: From SONET/SDH to WDM,”** IEEE Communications Magazine, June 2000.
- LIMA, Cesar Albuquerque, **“Redes Ópticas WDM Sem Bloqueio”**, tese de mestrado, abril de 2000, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Estadual de Campinas, Brasil.
- MUKHERJEE, B., **“Optical Communication Networks”**, McGraw-Hill, 1997.
- N. Ghani, S. Dixit and Ti Shiang Wang, **"On IP-over-WDM Integration"**, IEEE Communications Magazine, vol. 38, no. 3, March 2000.
- NASCIMENTO, Edimar José. **“Redes ópticas WDM”** dissertação de mestrado, setembro de 2001, Universidade Estadual de Campinas, Brasil.
- PAUL Bonenfant and A. Rodriguez-Moral, **"Optical Data Networking"**, IEEE Communications Magazine, vol. 38, no. 3, March 2000.
- PINTO, Juliana de Oliveira. **DWDM em Redes Metropolitanas**, 2003.

- RAMAMURTHY, H. and MUKHERJEE, B. “**Fixed-alternate routing and wavelength conversion in wavelength-routed optical networks**”, IEEE GLOBECOM’98, pp. 2295-2302.
- RAMASWAMI, R. and SIVARAJAN, K. N. “**Optical Networks: A Practical Perspective**”, Morgan Kaufmann Publishers, Inc., 1998.
- Revista Deutschland, editora Frankfurter Societäs-Druckerei GmbH – Frankenallee, Frankfurt do Meno.
- SOUZA, Eunézio Antônio de. **Fibras Ópticas**, Instituto de Física, UnB, 2002.
- SUBRAMANIAN, S. AZIZOGLU, M. and SOMANI, A. “**All Optical Networks with sparse wavelength Conversion**” IEEE Trans. On Networking, vol. 5, 1996.
- WIRTH, Almir. **Tudo sobre Fibras Ópticas: Teoria e prática**, Alta Books, Rio de Janeiro, 2002.
- YATES, J. M., M and RUMSEWICZ, M. P. “**Wavelength Converters in Dynamically-Reconfigurable WDM Networks**”, IEEE Communications Surveys, 1999.

8 ANEXOS

Anexo 1 – Código fonte do programa de geração da matriz de tráfego e topologia física

```
<form name="matriz" method="post" action="matriz.php">
  <p>Número de nós:
    <input name="valor" type="text" size="5" maxlength="4">
    <input type="submit" value="criar">
      <input type="hidden" name="variavel" value="matriz">
  </p>
</form>
<p> </p>

<?
switch ($variavel) {
  case matriz:
    echo "MATRIZ DE TRÁFEGO<br>";
    echo $valor."<br>";
    for ($i=0;$i<$valor;$i++){
      $coluna1=$i;
      for($j=0;$j<$valor;$j++){
        echo $coluna1 ." " $j ." ";
        (rand(0,1000)/1000)."<br>";
      }
    }

    echo "<hr>";
    echo "PREENCHA OS VALORES EM KM PARA AS ARESTAS: ";
  ?>

<form name="form1" method="post" action="matriz.php">
  <?
    for ($i=0;$i<$valor;$i++){
      $coluna1=$i;
      for($j=0;$j<$valor;$j++){
        echo $coluna1 ." " $j ." ";
        echo "<input type='text' name='campo[' size='4'> <br>";
      }
    }

    echo "<input type=submit value=criar>";
    echo "<input type=hidden name=variavel value=topologia>";
    echo "<input type=hidden name=valor value='$valor'>";
    echo "</form>";
  break;
```

case topologia:

```
echo "ARQUIVO PARA MATRIZ DE TRÁFEGO: <br>";
    echo $valor."<br>";

for ($i=0;$i<$valor;$i++){
    $coluna=$i;
    for($k=0;$k<$valor;$k++){
        echo $coluna ." &nbsp;". $k ." &nbsp;". (rand(0,1000)/1000)."<br>";
    }
}
echo "<hr>";
echo "ARQUIVO PARA TOPOLOGIA FÍSICA: <BR>";
    echo $valor."<br>";
        $vcampo=(count($campo))-1;
        $num=0;
for ($i=0;$i<$valor;$i++){
    $coluna=$i;
    for($k=0;$k<$valor;$k++){
        echo $coluna ."&nbsp;". $k ."&nbsp;". "$campo[$num]". "<br>";
        if($num<$vcampo){
            $num=$num+1;
        }
    }
}
break;
}
```

?>

Anexo 2 – Dados da Matriz de tráfego utilizado nos testes.

45																													
0	1	0.001	0	36	0.608	1	28	0.727	2	20	0.07	3	12	0.317	4	3	0.747	4	40	0.998	5	32	0.08	6	24	0.323	7	16	0.395
0	2	0.564	0	37	0.784	1	29	0.485	2	21	0.967	3	13	0.456	4	5	0.252	4	41	0.097	5	33	0.741	6	25	0.738	7	17	0.005
0	3	0.193	0	38	0.803	1	30	0.205	2	22	0.683	3	14	0.272	4	6	0.144	4	42	0.625	5	34	0.612	6	26	0.314	7	18	0.708
0	4	0.809	0	39	0.52	1	31	0.744	2	23	0.153	3	15	0.983	4	7	0.001	4	43	0.094	5	35	0.62	6	27	0.827	7	19	0.1
0	5	0.585	0	40	0.302	1	32	0.468	2	24	0.878	3	16	0.298	4	8	0.061	4	44	0.438	5	36	0.691	6	28	0.96	7	20	0.623
0	6	0.48	0	41	0.876	1	33	0.458	2	25	0.822	3	17	0.739	4	9	0.807	5	0	0.932	5	37	0.805	6	29	0.874	7	21	0.864
0	7	0.35	0	42	0.727	1	34	0.95	2	26	0.582	3	18	0.567	4	10	0.853	5	1	0.048	5	38	0.149	6	30	0.725	7	22	0.491
0	8	0.896	0	43	0.956	1	35	0.745	2	27	0.191	3	19	0.196	4	11	0.21	5	2	0.895	5	39	0.576	6	31	0.3	7	23	0.748
0	9	0.823	0	44	0.926	1	36	0.108	2	28	0.178	3	20	0.762	4	12	0.115	5	3	0.29	5	40	0.868	6	32	0.944	7	24	0.497
0	10	0.747	1	0	0.539	1	37	0.599	2	29	0.817	3	21	0.84	4	13	0.553	5	4	0.227	5	41	0.912	6	33	0.127	7	25	0.38
0	11	0.174	1	2	0.142	1	38	0.385	2	30	0.475	3	22	0.398	4	14	0.014	5	6	0.769	5	42	0.615	6	34	0.065	7	26	0.786
0	12	0.859	1	3	0.462	1	39	0.735	2	31	0.155	3	23	0.501	4	15	0.113	5	7	0.411	5	43	0.728	6	35	0.785	7	27	0.553
0	13	0.711	1	4	0.235	1	40	0.609	2	32	0.504	3	24	0.891	4	16	0.454	5	8	0.202	5	44	0.043	6	36	0.525	7	28	0.357
0	14	0.514	1	5	0.863	1	41	0.572	2	33	0.732	3	25	0.027	4	17	0.752	5	9	0.628	6	0	0.668	6	37	0.61	7	29	0.956
0	15	0.304	1	6	0.209	1	42	0.361	2	34	0.405	3	26	0.995	4	18	0.686	5	10	0.604	6	1	0.977	6	38	0.957	7	30	0.631
0	16	0.014	1	7	0.78	1	43	0.151	2	35	0.279	3	27	0.573	4	19	0.543	5	11	0.452	6	2	0.315	6	39	0.072	7	31	0.176
0	17	0.091	1	8	0.844	1	44	0.225	2	36	0.569	3	28	0.05	4	20	0.073	5	12	0.466	6	3	0.569	6	40	0.876	7	32	0.374
0	18	0.364	1	9	0.997	2	0	0.425	2	37	0.682	3	29	0.531	4	21	0.437	5	13	0.598	6	4	0.306	6	41	0.654	7	33	0.131
0	19	0.147	1	10	1	2	1	0.803	2	38	0.756	3	30	0.194	4	22	0.202	5	14	0.635	6	5	0.174	6	42	0.322	7	34	0.743
0	20	0.166	1	11	0.612	2	3	0.517	2	39	0.722	3	31	0.843	4	23	0.696	5	15	0.855	6	7	0.108	6	43	0.104	7	35	0.952
0	21	0.989	1	12	0.392	2	4	0.99	2	40	0.475	3	32	0.627	4	24	0.29	5	16	0.829	6	8	0.869	6	44	0.505	7	36	0.612
0	22	0.446	1	13	0.266	2	5	0.752	2	41	0.123	3	33	0.658	4	25	0.437	5	17	0.625	6	9	0.852	7	0	0.227	7	37	0.027
0	23	0.119	1	14	0.297	2	6	0.345	2	42	0.368	3	34	0.198	4	26	0.232	5	18	0.721	6	10	0.745	7	1	0.29	7	38	0.33
0	24	0.004	1	15	0.84	2	7	0.169	2	43	0.835	3	35	0.842	4	27	0.578	5	19	0.566	6	11	0.155	7	2	0.92	7	39	0.055
0	25	0.008	1	16	0.023	2	8	0.657	2	44	0.035	3	36	0.123	4	28	0.533	5	20	0.375	6	12	0.327	7	3	0.551	7	40	0.639
0	26	0.378	1	17	0.376	2	9	0.492	3	0	0.517	3	37	0.11	4	29	0.629	5	21	0.184	6	13	0.079	7	4	0.663	7	41	0.131
0	27	0.532	1	18	0.092	2	10	0.063	3	1	0.663	3	38	0.743	4	30	0.16	5	22	0.738	6	14	0.076	7	5	0.114	7	42	0.847

0 28	0.571	1 19	0.677	2 11	0.7	3 2	0.426	3 39	0.314	4 31	0.504	5 23	0.555	6 15	0.641	7 6	0.493	7 43	0.865
0 29	0.602	1 20	0.056	2 12	0.505	3 4	0.104	3 40	0.941	4 32	0.963	5 24	0.905	6 16	0.82	7 8	0.379	7 44	0.597
0 30	0.607	1 21	0.008	2 13	0.147	3 5	0.95	3 41	0.286	4 33	0.696	5 25	0.243	6 17	0.545	7 9	0.497	8 0	0.722
0 31	0.166	1 22	0.919	2 14	0.95	3 6	0.922	3 42	0.336	4 34	0.925	5 26	0.189	6 18	0.448	7 10	0.794	8 1	0.854
0 32	0.663	1 23	0.276	2 15	0.141	3 7	0.55	3 43	0.14	4 35	0.19	5 27	0.605	6 19	0.409	7 11	0.509	8 2	0.014
0 33	0.451	1 24	0.273	2 16	0.905	3 8	0.346	3 44	0.733	4 36	0.336	5 28	0.699	6 20	0.299	7 12	0.382	8 3	0.126
0 34	0.352	1 25	0.588	2 17	0.693	3 9	0.472	4 0	0.835	4 37	0.178	5 29	0.585	6 21	0.466	7 13	0.688	8 4	0.708
0 35	0.057	1 26	0.691	2 18	0.303	3 10	0.375	4 1	0.708	4 38	0.996	5 30	0.351	6 22	0.501	7 14	0.532	8 5	0.617
		1 27	0.838	2 19	0.426	3 11	0.847	4 2	0.6	4 39	0.457	5 31	0.494	6 23	0.152	7 15	0.606	8 6	0.217
8 7	0.066	9 0	0.228	9 38	0.255	10 31	0.275	11 24	0.939	12 17	0.592	13 9	0.518	14 2	0.05	14 40	0.809	15 33	0.617
8 9	0.169	9 1	0.864	9 39	0.684	10 32	0.145	11 25	0.195	12 18	0.199	13 10	0.109	14 3	0.81	14 41	0.876	15 34	0.265
8 10	0.624	9 2	0.229	9 40	0.946	10 33	0.982	11 26	0.78	12 19	0.95	13 11	0.908	14 4	0.169	14 42	0.583	15 35	0.25
8 11	0.341	9 3	0.249	9 41	0.435	10 34	0.62	11 27	0.646	12 20	0.876	13 12	0.203	14 5	0.06	14 43	0.595	15 36	0.732
8 12	0.319	9 4	0.542	9 42	0.891	10 35	0.292	11 28	0.657	12 21	0.392	13 14	0.518	14 6	0.31	14 44	0.079	15 37	0.788
8 13	0.367	9 5	0.985	9 43	0.007	10 36	0.923	11 29	0.91	12 22	0.988	13 15	0.655	14 7	0.785	15 0	0.793	15 38	0.171
8 14	0.661	9 6	0.053	9 44	0.941	10 37	0.367	11 30	0.455	12 23	0.185	13 16	0.438	14 8	0.212	15 1	0.462	15 39	0.714
8 15	0.803	9 7	0.081	10 0	0.602	10 38	0.695	11 31	0.922	12 24	0.896	13 17	0.688	14 9	0.322	15 2	0.591	15 40	0.481
8 16	0.807	9 8	0.525	10 1	0.786	10 39	0.218	11 32	0.664	12 25	0.575	13 18	0.09	14 10	0.485	15 3	0.59	15 41	0.081
8 17	0.527	9 10	0.427	10 2	0.577	10 40	0.156	11 33	0.15	12 26	0.442	13 19	0.079	14 11	0.009	15 4	0.569	15 42	0.807
8 18	0.611	9 11	0.094	10 3	0.142	10 41	0.24	11 34	0.636	12 27	0.627	13 20	0.075	14 12	0.44	15 5	0.816	15 43	0.856
8 19	0.798	9 12	0.259	10 4	0.222	10 42	0.521	11 35	0.57	12 28	0.709	13 21	0.027	14 13	0.508	15 6	0.673	15 44	0.124
8 20	0.901	9 13	0.892	10 5	0.383	10 43	0.903	11 36	0.422	12 29	0.049	13 22	0.355	14 15	0.606	15 7	0.343	16 0	0.307
8 21	0.144	9 14	0.232	10 6	0.004	10 44	0.106	11 37	0.943	12 30	0.285	13 23	0.307	14 16	0.759	15 8	0.01	16 1	0.573
8 22	0.63	9 15	0.146	10 7	0.418	11 0	0.903	11 38	0.541	12 31	0.26	13 24	0.697	14 17	0.401	15 9	0.267	16 2	0.473
8 23	0.402	9 16	0.125	10 8	0.082	11 1	0.442	11 39	0.579	12 32	0.408	13 25	0.142	14 18	0.35	15 10	0.341	16 3	0.762
8 24	0.253	9 17	0.932	10 9	0.66	11 2	0.08	11 40	0.536	12 33	0.896	13 26	0.395	14 19	0.843	15 11	0.232	16 4	0.192
8 25	0.136	9 18	0.08	10 11	0.855	11 3	0.782	11 41	0.255	12 34	0.71	13 27	0.067	14 20	0.943	15 12	0.771	16 5	0.728
8 26	0.856	9 19	0.047	10 12	0.064	11 4	0.171	11 42	0.397	12 35	0.729	13 28	0.676	14 21	0.623	15 13	0.372	16 6	0.995
8 27	0.066	9 20	0.058	10 13	0.811	11 5	0.975	11 43	0.35	12 36	0.896	13 29	0.725	14 22	0.998	15 14	0.87	16 7	0.015
8 28	0.428	9 21	0.336	10 14	0.662	11 6	0.776	11 44	0.036	12 37	0.393	13 30	0.198	14 23	0.053	15 16	0.116	16 8	0.648
8 29	0.573	9 22	0.915	10 15	0.692	11 7	0.871	12 0	0.796	12 38	0.397	13 31	0.694	14 24	0.563	15 17	0.726	16 9	0.692

8 30	0.302	9 23	0.398	10 16	0.803	11 8	0.21	12 1	0.196	12 39	0.904	13 32	0.616	14 25	0.864	15 18	0.629	16 10	0.174
8 31	0.548	9 24	0.433	10 17	0.53	11 9	0.457	12 2	0.07	12 40	0.308	13 33	0.655	14 26	0.387	15 19	0.894	16 11	0.072
8 32	0.225	9 25	0.947	10 18	0.686	11 10	0.003	12 3	0.389	12 41	0.388	13 34	0.544	14 27	0.306	15 20	0.183	16 12	0.275
8 33	0.311	9 26	0.837	10 19	0.142	11 12	0.751	12 4	0.591	12 42	0.571	13 35	0.098	14 28	0.284	15 21	0.536	16 13	0.677
8 34	0.11	9 27	0.534	10 20	0.69	11 13	0.114	12 5	0.07	12 43	0.353	13 36	0.545	14 29	0.026	15 22	0.902	16 14	0.839
8 35	0.808	9 28	0.842	10 21	0.728	11 14	0.405	12 6	0.197	12 44	0.734	13 37	0.049	14 30	0.613	15 23	0.78	16 15	0.557
8 36	0.134	9 29	0.694	10 22	0.778	11 15	0.311	12 7	0.156	13 0	0.746	13 38	0.975	14 31	0.391	15 24	0.966	16 17	0.371
8 37	0.284	9 30	0.398	10 23	0.031	11 16	0.993	12 8	0.644	13 1	0.737	13 39	0.464	14 32	0.018	15 25	0.197	16 18	0.78
8 38	0.788	9 31	0.259	10 24	0.869	11 17	0.038	12 9	0.454	13 2	0.74	13 40	0.97	14 33	0.031	15 26	0.902	16 19	0.232
8 39	0.896	9 32	0.004	10 25	0.645	11 18	0.252	12 10	0.604	13 3	0.139	13 41	0.728	14 34	0.456	15 27	0.798	16 20	0.638
8 40	0.79	9 33	0.526	10 26	0.707	11 19	0.189	12 11	0.698	13 4	0.2	13 42	0.531	14 35	0.858	15 28	0.954	16 21	0.231
8 41	0.744	9 34	0.955	10 27	0.085	11 20	0.247	12 13	0.441	13 5	0.272	13 43	0.68	14 36	0.937	15 29	0.849	16 22	0.204
8 42	0.615	9 35	0.399	10 28	0.552	11 21	0.153	12 14	0.685	13 6	0.681	13 44	0.693	14 37	0.402	15 30	0.891	16 23	0.971
8 43	0.361	9 36	0.241	10 29	0.948	11 22	0.62	12 15	0.396	13 7	0.912	14 0	0.372	14 38	0.727	15 31	0.629	16 24	0.282
8 44	0.857	9 37	0.586	10 30	0.058	11 23	0.886	12 16	0.836	13 8	0.368	14 1	0.388	14 39	0.612	15 32	0.185	16 25	0.022
16 26	0.769	17 19	0.913	18 11	0.984	19 4	0.63	19 42	0.508	20 35	0.732	21 28	0.059	22 20	0.982	23 13	0.731	24 6	0.771
16 27	0.151	17 20	0.522	18 12	0.463	19 5	0.91	19 43	0.803	20 36	0.916	21 29	0.491	22 21	0.636	23 14	1	24 7	0.228
16 28	0.047	17 21	0.44	18 13	0.214	19 6	0.591	19 44	0.435	20 37	0.67	21 30	0.632	22 23	0.295	23 15	0.97	24 8	0.557
16 29	0.009	17 22	0.107	18 14	0.3	19 7	0.919	20 0	0.004	20 38	0.298	21 31	0.747	22 24	0.477	23 16	0.868	24 9	0.807
16 30	0.348	17 23	0.354	18 15	0.782	19 8	0.506	20 1	0.339	20 39	0.809	21 32	0.756	22 25	0.875	23 17	0.841	24 10	0.852
16 31	0.644	17 24	0.823	18 16	0.342	19 9	0.489	20 2	0.376	20 40	0.378	21 33	0.255	22 26	0.079	23 18	0.146	24 11	0.331
16 32	0.343	17 25	0.428	18 17	0.481	19 10	0.45	20 3	0.128	20 41	0.998	21 34	0.91	22 27	0.101	23 19	0.374	24 12	0.539
16 33	0.414	17 26	0.17	18 19	0.608	19 11	0.89	20 4	0.828	20 42	0.773	21 35	0.792	22 28	0.143	23 20	0.284	24 13	0.992
16 34	0.416	17 27	0	18 20	0.102	19 12	0.941	20 5	0.734	20 43	0.204	21 36	0.199	22 29	0.143	23 21	0.171	24 14	0.87
16 35	0.09	17 28	0.658	18 21	0.985	19 13	0.183	20 6	0.892	20 44	0.17	21 37	0.553	22 30	0.918	23 22	0.974	24 15	0.647
16 36	0.545	17 29	0.774	18 22	0.756	19 14	0.252	20 7	0.643	21 0	0.388	21 38	0.051	22 31	0.309	23 24	0.742	24 16	0.227
16 37	0.699	17 30	0.063	18 23	0.151	19 15	0.203	20 8	0.651	21 1	0.181	21 39	0.522	22 32	0.374	23 25	0.717	24 17	0.813
16 38	0.338	17 31	0.089	18 24	0.456	19 16	0.731	20 9	0.514	21 2	0.581	21 40	0.791	22 33	0.814	23 26	0.03	24 18	0.371
16 39	0.658	17 32	0.386	18 25	0.712	19 17	0.942	20 10	0.734	21 3	0.195	21 41	0.704	22 34	0.046	23 27	0.645	24 19	0.367
16 40	0.877	17 33	0.684	18 26	0.999	19 18	0.625	20 11	0.737	21 4	0.961	21 42	0.024	22 35	0.814	23 28	0.813	24 20	0.035
16 41	0.535	17 34	0.808	18 27	0.776	19 20	0.041	20 12	0.958	21 5	0.19	21 43	0.732	22 36	0.24	23 29	0.736	24 21	0.561

16	42	0.57	17	35	0.154	18	28	0.642	19	21	0.641	20	13	0.466	21	6	0.382	21	44	0.553	22	37	0.898	23	30	0.818	24	22	0.398
16	43	0.054	17	36	0.142	18	29	0.621	19	22	0.034	20	14	0.363	21	7	0.304	22	0	0.915	22	38	0.256	23	31	0.124	24	23	0.119
16	44	0.466	17	37	0.048	18	30	0.947	19	23	0.556	20	15	0.112	21	8	0.12	22	1	0.876	22	39	0.269	23	32	0.719	24	25	0.325
17	0	0.26	17	38	0.346	18	31	0.688	19	24	0.545	20	16	0.905	21	9	0.198	22	2	0.797	22	40	0.208	23	33	0.375	24	26	0.899
17	1	0.427	17	39	0.018	18	32	0.29	19	25	0.446	20	17	0.822	21	10	0.046	22	3	0.305	22	41	0.229	23	34	0.65	24	27	0.201
17	2	0.864	17	40	0.979	18	33	0.567	19	26	0.061	20	18	0.455	21	11	0.771	22	4	0.395	22	42	0.846	23	35	0.916	24	28	0.941
17	3	0.487	17	41	0.648	18	34	0.29	19	27	0.996	20	19	0.108	21	12	0.761	22	5	0.482	22	43	0.875	23	36	0.89	24	29	0.125
17	4	0.087	17	42	0.053	18	35	0.548	19	28	0.127	20	21	0.87	21	13	0.881	22	6	0.052	22	44	0.888	23	37	0.032	24	30	0.85
17	5	0.566	17	43	0.915	18	36	0.713	19	29	0.601	20	22	0.762	21	14	0.001	22	7	0.652	23	0	0.845	23	38	0.774	24	31	0.894
17	6	0.71	17	44	0.638	18	37	0.246	19	30	0.05	20	23	0.039	21	15	0.449	22	8	0	23	1	0.609	23	39	0.449	24	32	0.446
17	7	0.779	18	0	0.432	18	38	0.547	19	31	0.172	20	24	0.417	21	16	0.426	22	9	0.769	23	2	0.04	23	40	0.007	24	33	0.222
17	8	0.865	18	1	0.021	18	39	0.493	19	32	0.66	20	25	0.937	21	17	0.802	22	10	0.756	23	3	0.173	23	41	0.228	24	34	0.635
17	9	0.851	18	2	0.242	18	40	0.952	19	33	0.332	20	26	0.067	21	18	0.461	22	11	0.219	23	4	0.183	23	42	0.418	24	35	0.56
17	10	0.293	18	3	0.392	18	41	0.67	19	34	0.316	20	27	0.165	21	19	0.495	22	12	0.154	23	5	0.356	23	43	0.156	24	36	0.624
17	11	0.865	18	4	0.654	18	42	0.765	19	35	0.654	20	28	0.211	21	20	0.75	22	13	0.057	23	6	0.449	23	44	0.919	24	37	0.424
17	12	0.645	18	5	0.782	18	43	0.623	19	36	0.41	20	29	0.117	21	22	0.238	22	14	0.671	23	7	0.185	24	0	0.502	24	38	0.016
17	13	0.747	18	6	0.022	18	44	0.446	19	37	0.427	20	30	0.591	21	23	0.559	22	15	0.032	23	8	0.895	24	1	0.243	24	39	0.864
17	14	0.829	18	7	0.826	19	0	0.799	19	38	0.221	20	31	0.118	21	24	0.092	22	16	0.346	23	9	0.623	24	2	0.755	24	40	0.139
17	15	0.766	18	8	0.138	19	1	0.746	19	39	0.679	20	32	0.618	21	25	0.922	22	17	0.698	23	10	0.546	24	3	0.907	24	41	0.267
17	16	0.872	18	9	0.634	19	2	0.989	19	40	0.166	20	33	0.58	21	26	0.894	22	18	0.798	23	11	0.912	24	4	0.213	24	42	0.292
17	18	0.909	18	10	0.55	19	3	0.204	19	41	0.498	20	34	0.69	21	27	0.857	22	19	0.436	23	12	0.523	24	5	0.032	24	43	0.682
24	44	0.561	25	37	0.027	26	30	0.561	27	22	0.802	28	15	0.182	29	8	0.595	30	1	0.044	30	39	0.22	31	32	0.9	32	24	0.606
25	0	0.959	25	38	0.289	26	31	0.875	27	23	0.593	28	16	0.745	29	9	0.272	30	2	0.484	30	40	0.301	31	33	0.379	32	25	0.305
25	1	0.607	25	39	0.597	26	32	0.25	27	24	0.87	28	17	0.134	29	10	0.132	30	3	0.02	30	41	0.787	31	34	0.728	32	26	0.784
25	2	0.788	25	40	0.884	26	33	0.301	27	25	0.318	28	18	0.058	29	11	0.198	30	4	0.839	30	42	0.65	31	35	0.206	32	27	0.15
25	3	0.423	25	41	0.432	26	34	0.727	27	26	0.94	28	19	0.526	29	12	0.601	30	5	0.619	30	43	0.083	31	36	0.053	32	28	0.543
25	4	0.819	25	42	0.932	26	35	0.867	27	28	0.268	28	20	0.359	29	13	0.487	30	6	0.541	30	44	0.263	31	37	0.605	32	29	0.689
25	5	0.74	25	43	0.383	26	36	0.231	27	29	0.944	28	21	0.807	29	14	0.355	30	7	0.604	31	0	0.136	31	38	0.354	32	30	0.395
25	6	0.135	25	44	0.533	26	37	0.19	27	30	0.719	28	22	0.158	29	15	0.23	30	8	0.569	31	1	0.217	31	39	0.361	32	31	0.994
25	7	0.517	26	0	0.01	26	38	0.447	27	31	0.127	28	23	0.9	29	16	0.478	30	9	0.778	31	2	0.563	31	40	0.668	32	33	0.102
25	8	0.02	26	1	0.975	26	39	0.891	27	32	0.775	28	24	0.131	29	17	0.692	30	10	0.64	31	3	0.178	31	41	0.976	32	34	0.412

25	9	0.006	26	2	0.866	26	40	0.574	27	33	0.473	28	25	0.029	29	18	0.949	30	11	0.697	31	4	0.632	31	42	0.223	32	35	0.027
25	10	0.749	26	3	0.437	26	41	0.028	27	34	0.176	28	26	0.181	29	19	0.671	30	12	0.76	31	5	0.107	31	43	0.896	32	36	0.688
25	11	0.334	26	4	0.7	26	42	0.996	27	35	0.026	28	27	0.818	29	20	0.983	30	13	0.868	31	6	0.454	31	44	0.347	32	37	0.259
25	12	0.903	26	5	0.333	26	43	0.059	27	36	0.041	28	29	0.249	29	21	0.237	30	14	0.158	31	7	0.759	32	0	0.954	32	38	0.169
25	13	0.462	26	6	0.602	26	44	0.619	27	37	0.455	28	30	0.571	29	22	0.514	30	15	0.423	31	8	0.334	32	1	0.665	32	39	0.228
25	14	0.768	26	7	0.499	27	0	0.257	27	38	0.863	28	31	0.347	29	23	0.236	30	16	0.787	31	9	0.057	32	2	0.201	32	40	0.189
25	15	0.05	26	8	0.56	27	1	0.17	27	39	0.136	28	32	0.54	29	24	0.898	30	17	0.021	31	10	0.282	32	3	0.282	32	41	0.863
25	16	0.631	26	9	0.039	27	2	0.116	27	40	0.014	28	33	0.665	29	25	0.484	30	18	0.438	31	11	0.694	32	4	0.355	32	42	0.764
25	17	0.024	26	10	0.378	27	3	0.231	27	41	0.212	28	34	0.871	29	26	0.326	30	19	0.042	31	12	0.874	32	5	0.532	32	43	0.047
25	18	0.683	26	11	0.233	27	4	0.495	27	42	0.819	28	35	0.933	29	27	0.538	30	20	0.506	31	13	0.568	32	6	0.291	32	44	0.483
25	19	0.97	26	12	0.938	27	5	0.96	27	43	0.797	28	36	0.946	29	28	0.571	30	21	0.269	31	14	0.869	32	7	0.22	33	0	0.056
25	20	0.5	26	13	0.86	27	6	0.049	27	44	0.78	28	37	0.105	29	30	0.336	30	22	0.068	31	15	0.081	32	8	0.099	33	1	0.962
25	21	0.707	26	14	0.965	27	7	0.079	28	0	0.659	28	38	0.153	29	31	0.348	30	23	0.245	31	16	0.796	32	9	0.106	33	2	0.085
25	22	0.266	26	15	0.609	27	8	0.337	28	1	0.299	28	39	0.558	29	32	0.169	30	24	0.983	31	17	1	32	10	0.71	33	3	0.566
25	23	0.823	26	16	0.584	27	9	0.28	28	2	0.782	28	40	0.801	29	33	0.29	30	25	0.506	31	18	0.635	32	11	0.844	33	4	0.963
25	24	0.647	26	17	0.076	27	10	0.516	28	3	0.922	28	41	0.896	29	34	0.219	30	26	0.616	31	19	0.619	32	12	0.672	33	5	0.574
25	26	0.597	26	18	0.407	27	11	0.491	28	4	0.842	28	42	0.072	29	35	0.923	30	27	0.071	31	20	0.595	32	13	0.819	33	6	0.879
25	27	0.263	26	19	0.305	27	12	0.412	28	5	0.242	28	43	0.873	29	36	0.74	30	28	0.367	31	21	0.593	32	14	0.005	33	7	0.409
25	28	0.845	26	20	0.499	27	13	0.925	28	6	0.499	28	44	0.823	29	37	0.807	30	29	0.956	31	22	0.194	32	15	0.491	33	8	0.403
25	29	0.46	26	21	0.08	27	14	0.601	28	7	0.023	29	0	0.388	29	38	0.651	30	31	0.86	31	23	0.979	32	16	0.605	33	9	0.413
25	30	0.748	26	22	0.875	27	15	0.292	28	8	0.075	29	1	0.549	29	39	0.687	30	32	0.337	31	24	0.231	32	17	0.936	33	10	0.659
25	31	0.351	26	23	0.304	27	16	0.476	28	9	0.03	29	2	0.672	29	40	0.27	30	33	0.242	31	25	0.042	32	18	0.29	33	11	0.824
25	32	0.014	26	24	0.782	27	17	0.402	28	10	0.356	29	3	0.451	29	41	0.767	30	34	0.289	31	26	0.239	32	19	0.606	33	12	0.946
25	33	0.477	26	25	0.933	27	18	0.952	28	11	0.716	29	4	0.281	29	42	0.064	30	35	0.051	31	27	0.255	32	20	0.747	33	13	0.283
25	34	0.627	26	27	0.588	27	19	0.548	28	12	0.41	29	5	0.95	29	43	0.722	30	36	0.993	31	28	0.407	32	21	0.874	33	14	0.002
25	35	0.404	26	28	0.216	27	20	0.835	28	13	0.18	29	6	0.983	29	44	0.859	30	37	0.172	31	29	0.795	32	22	0.913	33	15	0.616
25	36	0.383	26	29	0.279	27	21	0.795	28	14	0.298	29	7	0.728	30	0	0.341	30	38	0.068	31	30	0.272	32	23	0.83	33	16	0.049
33	17	0.656	34	10	0.087	35	3	0.753	35	41	0.007	36	33	0.538	37	26	0.487	38	19	0.553	39	12	0.66	40	5	0.01	40	43	0.111
33	18	0.422	34	11	0.317	35	4	0.847	35	42	0.261	36	34	0.22	37	27	0.828	38	20	0.569	39	13	0.122	40	6	0.956	40	44	0.102
33	19	0.955	34	12	0.472	35	5	0.638	35	43	0.289	36	35	0.066	37	28	0.559	38	21	0.533	39	14	0.507	40	7	0.537	41	0	0.69
33	20	0.604	34	13	0.629	35	6	0.359	35	44	0.953	36	37	0.204	37	29	0.279	38	22	0.219	39	15	0.112	40	8	0.387	41	1	0.827

33	21	0.201	34	14	0.333	35	7	0.475	36	0	0.86	36	38	0.197	37	30	0.347	38	23	0.077	39	16	0.28	40	9	0.012	41	2	0.491
33	22	0.414	34	15	0.079	35	8	0.094	36	1	0.517	36	39	0.193	37	31	0.054	38	24	0.304	39	17	0.546	40	10	0.237	41	3	0.454
33	23	0.34	34	16	0.615	35	9	0.415	36	2	0.708	36	40	0.199	37	32	0.912	38	25	0.064	39	18	0.792	40	11	0.886	41	4	0.654
33	24	0.623	34	17	0.142	35	10	0.188	36	3	0.256	36	41	0.957	37	33	0.763	38	26	0.411	39	19	0.369	40	12	0.593	41	5	0.418
33	25	0.809	34	18	0.28	35	11	0.343	36	4	0.921	36	42	0.594	37	34	0.368	38	27	0.133	39	20	0.858	40	13	0.152	41	6	0.64
33	26	0.004	34	19	0.825	35	12	0.914	36	5	0.491	36	43	0.739	37	35	0.282	38	28	0.251	39	21	0.745	40	14	0.016	41	7	0.099
33	27	0.105	34	20	0.439	35	13	0.229	36	6	0.093	36	44	0.294	37	36	0.211	38	29	0.821	39	22	0.464	40	15	0.535	41	8	0.831
33	28	0.394	34	21	0.995	35	14	0.31	36	7	0.826	37	0	0.68	37	38	0.324	38	30	0.509	39	23	0.36	40	16	0.917	41	9	0.368
33	29	0.277	34	22	0.221	35	15	0.154	36	8	0.076	37	1	0.786	37	39	0.05	38	31	0.268	39	24	0.442	40	17	0.653	41	10	0.878
33	30	0.317	34	23	0.107	35	16	0.341	36	9	0.282	37	2	0.922	37	40	0.882	38	32	0.988	39	25	0.586	40	18	0.224	41	11	0.52
33	31	0.825	34	24	0.519	35	17	0.182	36	10	0.384	37	3	0.929	37	41	0.249	38	33	0.917	39	26	0.379	40	19	0.405	41	12	0.963
33	32	0.854	34	25	0.264	35	18	0.272	36	11	0.643	37	4	0.845	37	42	0.404	38	34	0.121	39	27	0.632	40	20	0.966	41	13	0.395
33	34	0.311	34	26	0.007	35	19	0.206	36	12	0.515	37	5	0.259	37	43	0.145	38	35	0.284	39	28	0.558	40	21	0.097	41	14	0.726
33	35	0.197	34	27	0.576	35	20	0.172	36	13	0.431	37	6	0.105	37	44	0.876	38	36	0.707	39	29	0.483	40	22	0.399	41	15	0.631
33	36	0.565	34	28	0.771	35	21	0.335	36	14	0.14	37	7	0.061	38	0	0.608	38	37	0.471	39	30	0.837	40	23	0.506	41	16	0.374
33	37	0.469	34	29	0.107	35	22	0.065	36	15	0.975	37	8	0.904	38	1	0.784	38	39	0.295	39	31	0.185	40	24	0.335	41	17	0.814
33	38	0.996	34	30	0.97	35	23	0.502	36	16	0.074	37	9	0.148	38	2	0.197	38	40	0.344	39	32	0.009	40	25	0.328	41	18	0.853
33	39	0.433	34	31	0.369	35	24	0.964	36	17	0.005	37	10	0.893	38	3	0.452	38	41	0.525	39	33	0.109	40	26	0.626	41	19	0.063
33	40	0.368	34	32	0.904	35	25	0.81	36	18	0.915	37	11	0.359	38	4	0.762	38	42	0.811	39	34	0.04	40	27	0.251	41	20	0.744
33	41	0.419	34	33	0.522	35	26	0.446	36	19	0.412	37	12	0.957	38	5	0.433	38	43	0.517	39	35	0.221	40	28	0.29	41	21	0.362
33	42	0.385	34	35	0.222	35	27	0.913	36	20	0.756	37	13	0.381	38	6	0.637	38	44	0.067	39	36	0.256	40	29	0.534	41	22	0.235
33	43	0.58	34	36	0.302	35	28	0.179	36	21	0.187	37	14	0.331	38	7	0.805	39	0	0.83	39	37	0.41	40	30	0.899	41	23	0.819
33	44	0.878	34	37	0.478	35	29	0.482	36	22	0.101	37	15	0.685	38	8	0.174	39	1	0.554	39	38	0.708	40	31	0.478	41	24	0.784
34	0	0.337	34	38	0.31	35	30	0.472	36	23	0.423	37	16	0.888	38	9	0.322	39	2	0.103	39	40	0.443	40	32	0.328	41	25	0.274
34	1	0.393	34	39	0.414	35	31	0.699	36	24	0.678	37	17	0.38	38	10	0.964	39	3	0.51	39	41	0.133	40	33	0.675	41	26	0.563
34	2	0.951	34	40	0.765	35	32	0.248	36	25	0.527	37	18	0.433	38	11	0.71	39	4	0.947	39	42	0.544	40	34	0.46	41	27	0.174
34	3	0.509	34	41	0.842	35	33	0.937	36	26	0.825	37	19	0.675	38	12	0.197	39	5	0.723	39	43	0.857	40	35	0.583	41	28	0.124
34	4	0.418	34	42	0.389	35	34	0.277	36	27	0.837	37	20	0.267	38	13	0.863	39	6	0.474	39	44	0.807	40	36	0.413	41	29	0.757
34	5	0.608	34	43	0.427	35	36	0.299	36	28	0.271	37	21	0.483	38	14	0.047	39	7	0.451	40	0	0.218	40	37	0.923	41	30	0.414
34	6	0.777	34	44	0.724	35	37	0.823	36	29	0.499	37	22	0.528	38	15	0.743	39	8	0.919	40	1	0.924	40	38	0.121	41	31	0.279
34	7	0.083	35	0	0.735	35	38	0.82	36	30	0.871	37	23	0.802	38	16	0.036	39	9	0.549	40	2	0.313	40	39	0.665	41	32	0.171

Anexo 3 - Código fonte do programa Algoritmo Heurístico HLDA

Arquivo → Const.h

```
#ifndef __CONST
#define __CONST

#define MAX_VERTICES 50

#endif
```

Arquivo → fila.cpp

```
#include <stdlib.h>
#include "fila.h"

FilaInteiros::FilaInteiros()
{
    primeiro = NULL;
    ultimo = NULL;
}

void FilaInteiros::insere(int val)
{
    if (primeiro == NULL)
    {
        primeiro = new TNoFila;
        ultimo = primeiro;
        primeiro->valor = val;
        primeiro->prox = NULL;
    }
    else
    {
        ultimo->prox = new TNoFila;
        ultimo->prox->valor = val;
        ultimo->prox->prox = NULL;
        ultimo = ultimo->prox;
    }
}

int FilaInteiros::retira()
{
    struct SNoFila* no;
    int val;

    if ( primeiro == NULL )
        return -1;
```

```

else
{
    no = primeiro;
    primeiro = primeiro->prox;
    if ( primeiro == NULL )
        ultimo = NULL;
    val = no->valor;
    delete no;
    return val;
}
}

```

```

int FilaInteiros::vazia()
{
    if (primeiro == NULL )
        return 1;
    else
        return 0;
}

```

```

FilaInteiros::~FilaInteiros()
{
    struct SNoFila* atual, *anterior;

    atual = primeiro;

    while (atual != NULL)
    {
        anterior = atual;
        atual = atual->prox;
        delete anterior;
    }
}

```

Arquivo → fila.h

```

#ifndef __FILA_H
#define __FILA_H

struct SNoFila
{
    int valor;
    struct SNoFila* prox;
};

typedef struct SNoFila TNoFila;

```

```

class FilaInteiros
{
private:
    TNoFila* primeiro;
    TNoFila* ultimo;
public:
    int vazia();
    FilaInteiros();
    ~FilaInteiros();
    void insere(int);
    int retira();
};

```

```
#endif
```

Arquivo → grafo.cpp

```

#include <stdlib.h>
#include <stdio.h>
#include "grafo.h"

```

```

Grafo::Grafo()
{
    primeiroFluxo = NULL;
    primeiroPercurso = NULL;
}

```

```

Grafo::~~Grafo()
{
    liberaListaPercurso( this->primeiroPercurso );
    liberaListaFluxo( this->primeiroFluxo );
}

```

```

void Grafo::liberaListaArestas ( struct SArestaLista * primeiro )
{
    struct SArestaLista * anterior;

    while ( primeiro != NULL )
    {
        anterior = primeiro;
        primeiro = primeiro->prox;
        delete anterior;
    }
}

```

```

void Grafo::liberaListaPercurso( struct SVerticePercurso * primeiro )
{
    struct SVerticePercurso * anterior;

    while ( primeiro != NULL )
    {
        liberaListaArestas( primeiro->fluxosPertinentes );
        anterior = primeiro;
        primeiro = primeiro->prox;
        delete anterior;
    }
}

```

```

void Grafo::liberaListaFluxo( struct SVerticeFluxo * primeiro )
{
    struct SVerticeFluxo * anterior;

    while ( primeiro != NULL )
    {
        liberaListaArestas( primeiro->adjacencia );
        anterior = primeiro;
        primeiro = primeiro->prox;
        delete anterior;
    }
}

```

```

int Grafo::leArquivo( const char* nomeArquivo )
{
    FILE* arquivo;
    int numFluxo,
        fluxoVerticeOrigem,
        fluxoVerticeDestino,
        percursoVerticeOrigem,
        percursoVerticeDestino;

    arquivo = fopen( nomeArquivo, "rt" );

    if ( arquivo == NULL )
        return FALSE;

    while ( !feof(arquivo) )
    {
        fscanf( arquivo, "%d %d %d %d %d\n", &numFluxo, &fluxoVerticeOrigem,
            &fluxoVerticeDestino,
            &percursoVerticeOrigem, &percursoVerticeDestino );
    }
}

```

```

    incluiPercurso( numFluxo, fluxoVerticeOrigem, fluxoVerticeDestino,
                    percursoVerticeOrigem, percursoVerticeDestino );
}

fclose( arquivo );

return TRUE;
}

void Grafo::incluiPercurso( int numFluxo, int fluxoOrigem, int fluxoDestino,
                           int percursoOrigem, int percursoDestino )
{
    struct SArestaLista * fluxoAux;
    struct SVerticePercurso * percursoAux,
        * localInclusao;

    // Sempre um novo fluxo será adicionado.
    fluxoAux = new struct SArestaLista;
    fluxoAux->numFluxo = numFluxo;
    fluxoAux->verticeOrigem = fluxoOrigem;
    fluxoAux->verticeDestino = fluxoDestino;
    fluxoAux->prox = NULL;

    // Procura pelo percurso correspondente.
    localInclusao = this->primeiroPercurso;
    while ( localInclusao != NULL )
    {
        if ( ( localInclusao->verticeOrigem == percursoOrigem ) &&
            ( localInclusao->verticeDestino == percursoDestino ) )
            break;
        localInclusao = localInclusao->prox;
    }

    // Se não encontrou o percurso, cria um novo.
    if ( localInclusao == NULL )
    {
        percursoAux = new struct SVerticePercurso;
        percursoAux->verticeOrigem = percursoOrigem;
        percursoAux->verticeDestino = percursoDestino;
        percursoAux->fluxosPertinentes = fluxoAux;
        percursoAux->prox = this->primeiroPercurso;
        this->primeiroPercurso = percursoAux;
    }
    else
    {

```

```

// Se encontrou o percurso, cria um novo fluxo.
fluxoAux->prox = localInclusao->fluxosPertinentes;
localInclusao->fluxosPertinentes = fluxoAux;
}

return;
}

```

```

void Grafo::incluiFluxoSolitario( const int numFluxo, const int origem, const int destino
)
{
    struct SVerticeFluxo * aux;
    int encontrou = FALSE;

    aux = this->primeiroFluxo;

    while ( ( aux != NULL ) && (!encontrou) )
    {
        if ( aux->numFluxo == numFluxo )
            encontrou = TRUE;
        aux = aux->prox;
    }

    if ( !encontrou )
    {
        aux = new struct SVerticeFluxo;
        aux->cor = 0;

        aux->numFluxo = numFluxo;
        aux->verticeOrigem = origem;
        aux->verticeDestino = destino;

        aux->adjacencia = NULL;

        aux->prox = this->primeiroFluxo;
        this->primeiroFluxo = aux;
    }

    return;
}

```

```

void Grafo::geraGrafo()
{
    struct SVerticePercurso * atualPercurso, * anteriorPercurso;
    struct SArestaLista * atualFluxo1, * atualFluxo2;

```

```

atualPercurso = this->primeiroPercurso;

while ( atualPercurso != NULL )
{
    atualFluxo1 = atualPercurso->fluxosPertinentes;

    if ( atualFluxo1 != NULL )
        if ( atualFluxo1->prox == NULL )
            {
                incluiFluxoSolitario( atualFluxo1->numFluxo, atualFluxo1->verticeOrigem,
atualFluxo1->verticeDestino );
            }

    while ( atualFluxo1 != NULL )
        {
            atualFluxo2 = atualFluxo1->prox;

            while ( atualFluxo2 != NULL )
                {
                    incluiFluxo( atualFluxo1->numFluxo, atualFluxo1->verticeOrigem, atualFluxo1-
>verticeDestino,
                        atualFluxo2->numFluxo, atualFluxo2->verticeOrigem, atualFluxo2-
>verticeDestino );

                    atualFluxo2 = atualFluxo2->prox;
                }

            atualFluxo1 = atualFluxo1->prox;
        }

    liberaListaArestas( atualPercurso->fluxosPertinentes );
    anteriorPercurso = atualPercurso;
    atualPercurso = atualPercurso->prox;
    delete anteriorPercurso;
}

this->primeiroPercurso = NULL;

return;
}

void Grafo::incluiFluxo( const int numFluxo1, const int fluxoOrigem1, const int
fluxoDestino1,
                        const int numFluxo2, const int fluxoOrigem2, const int fluxoDestino2 )
{
    struct SVerticeFluxo * atual;
    struct SArestaLista * adjacente1, * adjacente2;

```

```

int encontrouFluxo1, encontrouFluxo2;

adjacente1 = new struct SArestaLista;
adjacente1->numFluxo = numFluxo1;
adjacente1->verticeOrigem = fluxoOrigem1;
adjacente1->verticeDestino = fluxoDestino1;
adjacente1->prox = NULL;

adjacente2 = new struct SArestaLista;
adjacente2->numFluxo = numFluxo2;
adjacente2->verticeOrigem = fluxoOrigem2;
adjacente2->verticeDestino = fluxoDestino2;
adjacente2->prox = NULL;

atual = this->primeiroFluxo;
encontrouFluxo1 = FALSE;
encontrouFluxo2 = FALSE;

while ( ( (!encontrouFluxo1) || (!encontrouFluxo2) ) && (atual != NULL) )
{
    if ( atual->numFluxo == numFluxo1 )
    {
        encontrouFluxo1 = TRUE;
        adjacente2->prox = atual->adjacencia;
        atual->adjacencia = adjacente2;
    }
    else
    if ( atual->numFluxo == numFluxo2 )
    {
        encontrouFluxo2 = TRUE;
        adjacente1->prox = atual->adjacencia;
        atual->adjacencia = adjacente1;
    }
    atual = atual->prox;
}

if ( !encontrouFluxo1 )
{
    atual = new struct SVerticeFluxo;
    atual->cor = 0;

    atual->numFluxo = numFluxo1;
    atual->verticeOrigem = fluxoOrigem1;
    atual->verticeDestino = fluxoDestino1;

    atual->adjacencia = adjacente2;

    atual->prox = this->primeiroFluxo;
}

```

```

    this->primeiroFluxo = atual;
}

if ( !encontrouFluxo2 )
{
    atual = new struct SVerticeFluxo;
    atual->cor = 0;

    atual->numFluxo = numFluxo2;
    atual->verticeOrigem = fluxoOrigem2;
    atual->verticeDestino = fluxoDestino2;

    atual->adjacencia = adjacente1;

    atual->prox = this->primeiroFluxo;
    this->primeiroFluxo = atual;
}
}

```

```

int Grafo::escreveGrafo( FILE* arquivo )
{
    struct SVerticeFluxo * atualFluxo;
    struct SArestaLista * atualAdjacente;

    if ( arquivo == NULL )
        return FALSE;

    /*atualFluxo = this->primeiroFluxo;

    while ( atualFluxo != NULL )
    {
        atualAdjacente = atualFluxo->adjacencia;
        fprintf(arquivo, "%d (%d-%d)", atualFluxo->numFluxo, atualFluxo->verticeOrigem,
atualFluxo->verticeDestino );

        while ( atualAdjacente != NULL )
        {
            fprintf(arquivo, " ->%d (%d-%d)", atualAdjacente->numFluxo, atualAdjacente-
>verticeOrigem, atualAdjacente->verticeDestino );

            atualAdjacente = atualAdjacente->prox;
        }

        fprintf(arquivo, "\n");

        atualFluxo = atualFluxo->prox;
    }

```

```

fprintf(arquivo, "\n" );*/

atualFluxo = this->primeiroFluxo;

fprintf(arquivo, "Comprimentos de onda utilizados:\n\n");

while ( atualFluxo != NULL )
{
    atualAdjacente = atualFluxo->adjacencia;
    fprintf(arquivo, "%d (%d-%d) = %d\n", atualFluxo->numFluxo, atualFluxo->verticeOrigem, atualFluxo->verticeDestino, atualFluxo->cor );

    atualFluxo = atualFluxo->prox;
}

return TRUE;
}

int Grafo::devolveCor(const int numFluxoAux )
{
    struct SVerticeFluxo * atual;

    atual = this->primeiroFluxo;

    while ( atual != NULL )
    {
        if ( atual->numFluxo == numFluxoAux )
            return atual->cor;

        atual = atual->prox;
    }

    return -1;
}

void Grafo::coloreGrafo()
{
    struct SVerticeFluxo * atualFluxo;
    struct SArestaLista * atualAdjacente;
    int escolheuCor;

    atualFluxo = this->primeiroFluxo;

    while ( atualFluxo != NULL )
    {
        do

```

```

{
    escolheuCor = TRUE;
    atualFluxo->cor++;

    atualAdjacente = atualFluxo->adjacencia;
    while ( atualAdjacente != NULL )
    {
        if ( devolveCor( atualAdjacente->numFluxo ) == atualFluxo->cor )
            escolheuCor = FALSE;
        atualAdjacente = atualAdjacente->prox;
    }
}
while ( !escolheuCor );

    atualFluxo = atualFluxo->prox;
}
}

```

Arquivo → grafo.h

```

#ifndef __GRAFO
#define __GRAFO

#define TRUE 1
#define FALSE 0

struct SArestaLista
{
    int numFluxo,
        verticeOrigem,
        verticeDestino;
    struct SArestaLista * prox;
};

struct SVerticePercurso
{
    int verticeOrigem,
        verticeDestino;
    struct SArestaLista * fluxosPertinentes;
    struct SVerticePercurso * prox;
};

struct SVerticeFluxo
{
    int numFluxo,
        verticeOrigem,
        verticeDestino,
        cor;
}

```

```

struct SArestaLista * adjacencia;
struct SVerticeFluxo * prox;
};

class Grafo
{
private:
    struct SVerticeFluxo * primeiroFluxo;
    struct SVerticePercurso * primeiroPercurso;
    void incluiFluxo( const int numFluxo1, const int fluxoOrigem1, const int
fluxoDestino1,
                    const int numFluxo2, const int fluxoOrigem2, const int fluxoDestino2 );
    void incluiFluxoSolitario( const int numFluxo, const int origem, const int destino );
    void liberaListaFluxo( struct SVerticeFluxo * primeiro );
    void liberaListaPercurso( struct SVerticePercurso * primeiro );
    void liberaListaArestas ( struct SArestaLista * primeiro );
    int devolveCor( const int numFluxoAux );
public:
    Grafo();
    ~Grafo();
    void incluiPercurso( int numFluxo, int fluxoOrigem, int fluxoDestino,
                        int percursoOrigem, int percursoDestino );
    int leArquivo( const char* nomeArquivo );
    void geraGrafo();
    void coloreGrafo();
    int escreveGrafo( FILE* );
};

#endif

```

Arquivo → hlda.cpp

```

#include <stdio.h>
#include "hlda.h"

void Hlda::maioresValores( int* linhaPrimeiro, int* colunaPrimeiro, int* linhaSegundo,
int* colunaSegundo)
{
    float maiorValor; int linha, coluna;

    maiorValor = 0.0;
    *linhaPrimeiro = 0;
    *colunaPrimeiro = 1;

    for ( linha = 0; linha < this->numVertices; linha++ )
        for ( coluna = 0; coluna < this->numVertices; coluna++ )
            if ( matrizAuxiliar[linha][coluna] > maiorValor )
                {

```

```

        maiorValor = matrizAuxiliar[linha][coluna];
        *linhaPrimeiro = linha;
        *colunaPrimeiro = coluna;
    }

    maiorValor = 0.0;
    *linhaSegundo = 0;
    *colunaSegundo = 2;

    for ( linha = 0; linha < this->numVertices; linha++ )
        for ( coluna = 0; coluna < this->numVertices; coluna++ )
            if ( matrizAuxiliar[linha][coluna] > maiorValor )
                if ( ( linha != *linhaPrimeiro ) || ( coluna != *colunaPrimeiro ) )
                    {
                        maiorValor = matrizAuxiliar[linha][coluna];
                        *linhaSegundo = linha;
                        *colunaSegundo = coluna;
                    }
    }

```

```

Hlda::Hlda(PilhaInteiros * topVir, int numVert)
{
    topologiaVirtual = topVir;
    //matrizTrafego = matrizTraf;
    numVertices = numVert;
}

```

```

void Hlda::atribuiTrafego( int origem, int destino, float trafego )
{
    matrizTrafego[origem][destino] = trafego;
}

```

```

int Hlda::calculaHlda( int ordem )
{
    int vetorOrdemOrigem [MAX_VERTICES],
        vetorOrdemDestino [MAX_VERTICES];
    int linha, coluna, parar, erro,
        linhaPrimeiroMaior, colunaPrimeiroMaior, linhaSegundoMaior,
        colunaSegundoMaior;

    if (this->numVertices == 0)
    {
        printf( "O arquivo com a matriz de tráfego ainda não foi lido." );
        return 0;
    }
}

```

```

else
{
for ( linha = 0; linha < this->numVertices; linha++ )
for ( coluna = 0; coluna < this->numVertices; coluna++ )
matrizAuxiliar [linha] [coluna] = matrizTrafego[linha][coluna];

for ( linha = 0; linha < this->numVertices; linha++ )
{
vetorOrdemOrigem[linha] = 0;
vetorOrdemDestino[linha] = 0;
}

do
{
maioresValores ( &linhaPrimeiroMaior, &colunaPrimeiroMaior,
&linhaSegundoMaior, &colunaSegundoMaior );

if ( ( vetorOrdemOrigem[linhaPrimeiroMaior] == ordem ) || (
vetorOrdemDestino[colunaPrimeiroMaior] == ordem ) )
matrizAuxiliar[linhaPrimeiroMaior][colunaPrimeiroMaior] = 0.0;
else
{
topologiaVirtual->empilha(linhaPrimeiroMaior, colunaPrimeiroMaior);

if ( matrizAuxiliar[linhaSegundoMaior][colunaSegundoMaior] == 0.0 )
matrizAuxiliar[linhaPrimeiroMaior][colunaPrimeiroMaior] = 0.0;
else
matrizAuxiliar[linhaPrimeiroMaior][colunaPrimeiroMaior] -=
matrizAuxiliar[linhaSegundoMaior][colunaSegundoMaior];

vetorOrdemOrigem[linhaPrimeiroMaior]++;

vetorOrdemDestino[colunaPrimeiroMaior]++;
}

parar = 1;

for ( linha = 0; linha < this->numVertices; linha++ )
for ( coluna = 0; coluna < this->numVertices; coluna++ )
if ( matrizAuxiliar[linha][coluna] != 0.0 )
parar = 0;
}
while (!parar);

erro = 0;
for ( linha = 0; linha < this->numVertices; linha++ )
{

```

```

    if ( vetorOrdemDestino[linha] == 0 )
        erro = 1;
    if ( vetorOrdemOrigem[linha] == 0 )
        erro = 1;
    }

    if ( erro )
        return 0;
    else
        return 1;
    }
}

```

Arquivo → hlda.h

```

#ifndef __HLDA
#define __HLDA

#include "const.h"
#include "pilha.h"

class Hlda
{
private:
    float matrizTrafego [MAX_VERTICES] [MAX_VERTICES];
    float matrizAuxiliar [MAX_VERTICES] [MAX_VERTICES];
    PilhaInteiros * topologiaVirtual;
    int numVertices;
public:
    Hlda (PilhaInteiros * topVir, int numVert);
    int calculaHlda(int ordem);
    void atribuiTrafego( int origem, int destino, float trafego );
    void maioresValores ( int* linhaPrimeiro, int* colunaPrimeiros, int* linhaSegundo,
int* colunaSegundo );
};

#endif

```

Arquivo → menor.cpp

```

#include "menor.h"
#include "fila.h"

int MenorCaminho::quantosNos( int origem, int destino )
{
    int quantos = 0,
        atual = destino;

```

```

while ( ( atual != origem ) && ( atual != -1 )
{
    quantos++;
    atual = caminho[atual].verticeOrigem;
}

if ( atual == -1 )
    return -1;
else
    return quantos;
}

```

```

void MenorCaminho::obtemCaminho(int origem, int destino, int* vetorCaminho,
                                int*
numNos)
{
    int verticeAtual, verticeAdjacente, i, inclui, atual;

    FilaInteiros fila;

    for ( i = 0; i < numVertices; i++ )
    {
        this->caminho[i].verticeOrigem = -1;
        this->caminho[i].distancia = -1;
    }

    caminho[origem].distancia = 0;

    fila.insere(origem);

    while (!fila.vazia())
    {
        verticeAtual = fila.retira();

        for ( verticeAdjacente = 0; verticeAdjacente < numVertices;
              verticeAdjacente++)
        {
            if ( matrizDistancias[verticeAtual][verticeAdjacente] != -1 )
            {
                inclui = 0;
                if ( caminho[verticeAdjacente].verticeOrigem == -1 )
                    inclui = 1;
                else
                    if ( caminho[verticeAdjacente].distancia >

```

```

        ( caminho[verticeAtual].distancia +
          matrizDistancias[verticeAtual][verticeAdjacente]
    ))
        inclui = 1;
    else
        if ( caminho[verticeAdjacente].distancia ==
            ( caminho[verticeAtual].distancia +
              matrizDistancias[verticeAtual][verticeAdjacente] ) )
            if ( ( quantosNos(origem, verticeAtual) + 1 ) <
                quantosNos(origem,
verticeAdjacente) )
                inclui = 1;

        if (inclui)
        {
            caminho[verticeAdjacente].verticeOrigem = verticeAtual;
            caminho[verticeAdjacente].distancia =
caminho[verticeAtual].distancia +

            matrizDistancias[verticeAtual][verticeAdjacente];
            if ( verticeAdjacente != destino )
                fila.insere(verticeAdjacente);
        }
    }
}

*numNos = quantosNos(origem, destino) + 1;
if ((*numNos) != 0)
{
    i = quantosNos(origem, destino);
    vetorCaminho[i] = destino;
    i--;
    atual = destino;

    while ( atual != origem )
    {
        vetorCaminho[i] = caminho[atual].verticeOrigem;
        atual = caminho[atual].verticeOrigem;
        i--;
    }
}
}
}

```

MenorCaminho::MenorCaminho(int numVert)

```

{
    int i, j;

    this->numVertices = numVert;

    for ( i = 0; i < numVert; i++ )
        for ( j = 0; j < numVert; j++ )
            this->matrizDistancias[i][j] = -1;
}

void MenorCaminho::incluiAdjacencia(int verticeOrigem, int verticeDestino, int dist)
{
    this->matrizDistancias[verticeOrigem][verticeDestino] = dist;
}

```

Arquivo → menor.h

```

#ifndef __MENOR_H
#define __MENOR_H

#define MAX_VERTICES 50

struct SCaminho
{
    int verticeOrigem,
        distancia;
};

class MenorCaminho
{
private:
    int numVertices;
    int matrizDistancias [MAX_VERTICES] [MAX_VERTICES];
    struct SCaminho caminho [MAX_VERTICES];
public:
    MenorCaminho(int numVert);
    void incluiAdjacencia(int verticeOrigem, int verticeDestino, int dist);
    void obtemCaminho(int origem, int destino, int * vetorCaminho, int* numNos);
    int quantosNos( int origem, int destino );
};

#endif

```

Arquivo → pilha.cpp

```
#include <stdlib.h>
#include "pilha.h"
```

```
PilhaInteiros::PilhaInteiros()
{
    topo = NULL;
}
```

```
void PilhaInteiros::empilha(int orig, int dest)
{
    TNoPilha* novo;

    novo = new TNoPilha;

    novo->origem = orig;
    novo->destino = dest;
    novo->prox = this->topo;
    this->topo = novo;
}
```

```
void PilhaInteiros::desempilha(int* orig, int* dest)
{
    TNoPilha* desempilhado;

    if (this->topo != NULL)
    {
        desempilhado = this->topo;
        this->topo = this->topo->prox;
        *orig = desempilhado->origem;
        *dest = desempilhado->destino;
        delete desempilhado;
    }
}
```

```
int PilhaInteiros::pilhaVazia()
{
    if (this->topo == NULL)
        return 1;
    else
        return 0;
}
```

```
PilhaInteiros::~~PilhaInteiros()
{
}
```

```
TNoPilha* anterior, *atual;

atual = this->topo;

while (atual != NULL)
{
    anterior = atual;
    atual = atual->prox;

    delete anterior;
}

this->topo = NULL;
}
```

Arquivo → pilha.h

```
#ifndef __PILHA_H
#define __PILHA_H

struct SNoPilha
{
    int origem,
        destino;
    struct SNoPilha * prox;
};

typedef struct SNoPilha TNoPilha;

class PilhaInteiros
{
private:
    TNoPilha* topo;
public:
    PilhaInteiros();
    ~PilhaInteiros();
    int pilhaVazia();
    void empilha(int, int);
    void desempilha(int*, int*);
};

#endif
```

Arquivo → projeto.cpp

```
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include "projeto.h"
#include "hlda.h"
#include "menor.h"
#include "grafo.h"
```

```
CProjeto::CProjeto( )
{
    this->numVerticesMatrizTrafego = 0;
    this->numVerticesTopologiaFisica = 0;
}
```

```
CProjeto::~~CProjeto()
{
}
```

```
int CProjeto::leMatrizTrafego( const char* nomeArquivo )
{
    FILE* arquivo;
    int linha, coluna;
    float trafego;

    arquivo = fopen( nomeArquivo, "rt" );
    if ( arquivo == NULL )
        return 0;
    else
    {
        fscanf( arquivo, "%d\n", &(this->numVerticesMatrizTrafego) );
        if ( this->numVerticesMatrizTrafego > MAX_VERTICES )
        {
            printf( "O número máximo de nós é %d. Você está apresentando uma matriz de
tráfego com %d nós.",
                MAX_VERTICES, this->numVerticesMatrizTrafego );
            return 0;
        }
        else
        {
            for ( linha = 0; linha < this->numVerticesMatrizTrafego; linha++ )
                for ( coluna = 0; coluna < this->numVerticesMatrizTrafego; coluna++ )
                    this->matrizTrafego[linha][coluna] = 0.0;

            while ( !feof(arquivo) )
            {
                fscanf ( arquivo, "%d %d %f\n", &linha, &coluna, &trafego );
```

```

        this->matrizTrafego[linha][coluna] = trafego;
    }
}

fclose(arquivo);
return 1;
}
}

int CProjeto::leTopologiaFisica( const char* nomeArquivo )
{
    FILE* arquivo;
    int linha, coluna, distancia;

    arquivo = fopen( nomeArquivo, "rt" );
    if ( arquivo == NULL )
        return 0;
    else
    {
        fscanf( arquivo, "%d\n", &(this->numVerticesTopologiaFisica) );
        if ( this->numVerticesTopologiaFisica > MAX_VERTICES )
        {
            printf( "O número máximo de nós é %d. Você está apresentando uma matriz de
tráfego com %d nós.",
                MAX_VERTICES, this->numVerticesTopologiaFisica );
            return 0;
        }
        else
            while ( !feof(arquivo) )
            {
                fscanf ( arquivo, "%d %d %d\n", &linha, &coluna, &distancia );

                topologiaFisica->incluiAdjacencia(linha, coluna, distancia);
            }

        fclose(arquivo);
        return 1;
    }
}

int CProjeto::roda(int ordem, char* arquivoTrafego, char* arquivoTopFis, char*
nomeArquivoSaida)
{
    Hlda * hlda;
    Grafo grafo;
    int origem, destino, linha, coluna, numNos, contador;

```

```

int caminho [MAX_VERTICES];
FILE* arquivoSaida;

this->topologiaVirtual = new PilhaInteiros();
this->leMatrizTrafego( arquivoTrafego );

this->topologiaFisica = new MenorCaminho(this->numVerticesMatrizTrafego);
this->leTopologiaFisica( arquivoTopFis );

hlda = new Hlda(this->topologiaVirtual, this->numVerticesMatrizTrafego );

for (linha = 0; linha < this->numVerticesMatrizTrafego; linha++)
    for (coluna = 0; coluna < this->numVerticesMatrizTrafego; coluna++)
        if ( this->matrizTrafego[linha][coluna] != -1 )
            hlda->atribuiTrafego(linha, coluna, matrizTrafego[linha][coluna]);

arquivoSaida = fopen(nomeArquivoSaida, "wt");

if ( !hlda->calculaHlda( ordem ) )
{
    fprintf( arquivoSaida, "Nao foi possivel executar o algoritmo de HLDA
corretamente.\n");
    fprintf( arquivoSaida, "Um dos vertices nao possui arcos de entrada ou saida.\n\n");
    fprintf( arquivoSaida, "Caminhos ópticos encontrados:\n");

    while( !topologiaVirtual->pilhaVazia() )
    {
        topologiaVirtual->desempilha(&origem, &destino);

        fprintf(arquivoSaida, "%d => %d", origem, destino );
    }
}
else
{
    fprintf( arquivoSaida, "Links opticos e caminhos que serao utilizados:\n\n");

    contador = 0;
    while( !topologiaVirtual->pilhaVazia() )
    {
        topologiaVirtual->desempilha(&origem, &destino);
        fprintf(arquivoSaida, "%d => %d\n", origem, destino );

        topologiaFisica->obtemCaminho(origem, destino, (int*) caminho, &numNos);

        if (numNos == 0)
            fprintf(arquivoSaida, "Nao existe caminho ligando os nos %d e %d.", origem,
destino);
        else

```

```

    for (linha = 0; linha < numNos; linha++)
    {
        if (linha != (numNos-1))
        {
            grafo.incluiPercurso(contador, origem, destino, caminho[linha],
caminho[linha+1]);
            contador++;
        }
        fprintf( arquivoSaida, "%d ", caminho[linha]);
    }

    fprintf(arquivoSaida, "\n\n");
}

    grafo.geraGrafo();
    grafo.coloreGrafo();
    grafo.escreveGrafo(arquivoSaida);
    fclose(arquivoSaida);
}

return 1;
}

```

// ordem, matriz de tráfego, topologia física e arquivo de saída.

```

int main(int nArgs, char** strArgs)
{
    CProjeto projeto;

    if (nArgs != 5)
    {
        printf("Erro no numero de argumentos!");
        return -1;
    }
    else
    {
        projeto.roda(atoi(strArgs[1]), strArgs[2], strArgs[3], strArgs[4]);
        return 0;
    }
}

```

Arquivo → projeto.h

```
#ifndef __PROJETO_H
#define __PROJETO_H

#include "const.h"
#include "pilha.h"
#include "menor.h"

class CProjeto
{
private:
    int numVerticesMatrizTrafego,
        numVerticesTopologiaFisica;
    PilhaInteiros* topologiaVirtual;
    MenorCaminho* topologiaFisica;
    float matrizTrafego [MAX_VERTICES][MAX_VERTICES];
    int ordem;
public:
    CProjeto();
    ~CProjeto();

    int leMatrizTrafego( const char* );
    int leTopologiaFisica( const char* );
    int roda(int ordem, char* arquivoTrafego, char* arquivoTopFis, char*
nomeArquivoSaida);
};

#endif
```
